



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE BRASILEIRO VERAS LIMA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DO RESÍDUO DA SUCATA TIPO FLUFF DE UMA
PLANTA SHREDDER NO RECIFE**

Recife
2019

HENRIQUE BRASILEIRO VERAS LIMA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DO RESÍDUO DA SUCATA TIPO FLUFF DE UMA
PLANTA SHREDDER NO RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco como
requisito básico para a obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^o. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Recife

2019

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L732a Lima, Henrique Brasileiro Veras.

Análise energética do resíduo da sucata tipo *fluff* de uma planta *shredder* no Recife / Henrique Brasileiro Veras Lima. - 2019.

76 folhas, il. e tab.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Resíduo de sucata. 3. *Fluff*. 4. Poder calorífico. 4. Análise imediata. I. Henríquez Guerrero, Jorge Recarte (Orientador). II. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2019-214



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2

Aos vinte e quatro dias do mês maio do ano de dois mil e dezenove, às 13:30, na Laboratório do DEMEC - LABTERMO do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **ANÁLISE ENERGÉTICA DO RESÍDUO DA SUCATA TIPO FLUFF DE UMA PLANTA SHREDDER NO RECIFE**, elaborado pelo aluno **Henrique Brasileiro Veras Lima**, CPF 095.068.874-62, composta pelo Prof. **Jorge Recarte Henríquez Guerrero** (Orientador), Prof. **Flávio Augusto Bueno Figueiredo** (examinador 1) e Prof. **Rogério Pontes de Araújo** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela _____ (aprovação/reprovação) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média 9,0 (nove virgula zero). Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof. **Jorge Recarte Henríquez Guerrero** - DEMEC/ UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof. **Flávio Augusto Bueno Figueiredo** - DEMEC/ UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof. **Wilson Francisco de Assis** - Grupo Gerdau Nota: _____

Assinatura: _____

Recife, 10 de Junho de 2019

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre me amparou nos momentos mais difíceis. Aos meus pais, modelos de caráter, sabedoria e, acima de tudo, meus melhores amigos.

Ao meu orientador, professor Doutor Jorge R. Henríquez Guerrero, que através da nobre missão de docente foi fundamental para a elaboração deste trabalho e para minha formação profissional.

A Wilson Francisco de Assis, que foi meu supervisor de estágio e sempre acreditou no meu trabalho, me ensinando bastante sobre o processo siderúrgico e liderança além de me incentivar a desenvolver a pesquisa nesse tema. Ao professor Mestre Daniel Rodríguez López, que ajudou e ensinou durante toda a realização dos experimentos e análise dos resultados. Ambos, com paciência, dedicação e maestria contribuíram decisivamente com o desenvolvimento do presente trabalho.

Agradeço à minha irmã, meus avós, meus tios e meus amigos, pelo apoio e carinho incondicional que me oferecem diariamente. À Universidade Federal de Pernambuco por me acolher e me formar um profissional ético e competente.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, hoje sou um profissional preparado para o mercado de trabalho e para a vida, graças às experiências que passei e os mentores e amigos que fiz ao longo dessa jornada. O conhecimento adquirido foi um presente para mim, mas os ensinamentos da vida são os que vão permanecer para sempre.

RESUMO

Usinas siderúrgicas semi-integradas têm como matérias-primas básicas a sucata e sendo grande consumidora de energia e de materiais, é responsável por um significativo volume de resíduos sólidos, além de efluentes líquidos e gasosos. Entre os resíduos sólidos, tem-se o Fluff, também conhecido como Resíduo de Shredder, que é a fração de materiais mais leves como plásticos, madeiras, borrachas entre outros que resulta do processo de trituração da sucata e separação da fração ferrosa que alimenta os fornos elétricos a arco (FEA) da aciaria. O Fluff é destinado frequentemente a aterros sanitários Classe 2, gerando impacto ambiental e onerando o custo de produção do aço. Este estudo analisa o potencial energético do Fluff para uso como vetor energético na usina. Amostras coletadas diretamente da saída da esteira de Fluff foram selecionadas utilizando uma metodologia de quarteamento para obter uma amostra representativa do lote processado. Em cada amostra foi determinado o Poder Calorífico e realizada uma Análise Imediata obtendo a sua composição de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas. As análises foram comparadas com dados da literatura de combustíveis sólidos convencionais e com análises de Fluff obtidos em amostras de usinas siderúrgicas de outras localidades. Os resultados mostram que o resíduo apresenta um potencial de uso para fins energéticos e que isto pode representar uma redução de custos com energia na usina. Além disso, a comparação direta com os dados da literatura mostra que a composição da análise imediata e o poder calorífico são dependentes do processo de separação e do perfil de sucata utilizado.

Palavras-chave: Resíduo de sucata. Fluff. Poder calorífico. Análise imediata.

ABSTRACT

Semi-integrated steel mills have as basic raw materials the scrap and being a major consumer of energy and materials, is responsible for a significant volume of solid waste, as well as liquid and gaseous effluents. Among the solid residues is the Fluff, also known as Shredder Residue, which is the fraction of lighter materials such as plastics, wood, rubbers and others that results from the process of shredding the scrap and separating the ferrous fraction that feeds the electric arc furnace (EAF) of the steel plant. Fluff is often sent to Class 2 landfills, causing environmental impact and raising steel production costs. This study analyzes the energy potential of Fluff for use as an energy vector in the plant. Samples of Fluff collected directly from the outlet of the conveyor belt were selected using a quartering methodology to obtain a representative sample of the processed batch. In each sample, the High Heating Value was determined, and a Proximate Analysis was obtained obtaining its composition of moisture, volatile, fixed carbon and ash. The results were compared with data from the literature of conventional solid fuels and with Fluff analyzes obtained in samples of steel mills from other locations. The results show that the waste presents a potential use for energy purposes and that this may represent a reduction of energy costs in the plant. In addition, a direct comparison with the literature data shows that the composition of the Proximate Analysis and the High Heating Value are dependent on the separation process and the scrap type used.

Keywords: Shredder residue. Fluff. Heating value. Proximate analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Produção Mundial de aço em milhões de toneladas	13
Figura 2 –	Ilustração de sucata sendo processada no Shredder	14
Figura 3 –	Distribuição de materiais no Fluff com granulometria > 2mm	15
Figura 4 –	Layout da nova planta de combustão. Os números vermelhos indicam as melhorias no processo	19
Figura 5 –	Fluxograma das rotas do processo siderúrgico. Em destaque, a rota semi-integrada	22
Figura 6 –	Etapas do processo de fusão da sucata em um forno elétrico a arco (FEA)	23
Figura 7 –	Ilustração de um vazamento e adição de ligas em uma panela	24
Figura 8 –	Balanço energético em um Forno Elétrico a Arco (FEA) ...	25
Figura 9 –	Desenho do Moinho do Shredder	26
Figura 10 –	Visão do processo de trituração da sucata no Shredder....	27
Figura 11 –	Processo de trituração de sucata e os resíduos gerados...	28
Figura 12 –	Processo de separação do Fluff por granulometria (Em destaque, a fração do material estudada no presente trabalho)	30
Figura 13 –	Representação de funcionamento do Eddy Current	31
Figura 14 –	Resultados experimentais para o grau de pureza e recuperação do alumínio e dos não ferrosos no produto a partir dos resíduos do Shredder.....	31
Figura 15 -	Representação dos efeitos de uma distribuição de granulometria inadequada na separação de metais por efeito Eddy Current	32
Figura 16 -	Análise imediata feita automaticamente em um TG	37
Figura 17 -	Imagem de um TGA	37
Figura 18 -	Conjunto de peneiras para análise granulométrica do material	39
Figura 19 -	Algumas técnicas para conversão do Fluff e seu produtos.	40

Figura 20 -	Foto do quarteamento realizado	42
Figura 21 -	Peneira vibratória utilizada na separação gravimétrica do Fluff	43
Figura 22 -	Ambiente adequado para a separação manual do Fluff	43
Figura 23 -	Partes de uma Bomba Calorimétrica	44
Figura 24 -	Preparação da amostra de Fluff	45
Figura 25 -	Pesagem da amostra a ser queimada	46
Figura 26 -	Fio de ignição sendo posicionado nos terminais da bomba calorimétrica	47
Figura 27-	Cadinhos e tampas colocados na estufa para eliminação da umidade	48
Figura 28 -	Cadinhos tampados no dessecador por 30 minutos	48
Figura 29 -	Cadinhos com amostra sendo retirados do forno mufla após a saída dos voláteis	49
Figura 30 -	Linha de não ferrosos da planta Shredder – destaque para o Fluff miúdo da TC13	54
Figura 31 -	Proporção dos resíduos gerados em um mês de produção da planta Shredder	56
Figura 32 -	Fluff gerado(kg) por tonelada de sucata processada no Shredder mês a mês. Dados coletados na planta Shredder estudada no presente trabalho entre janeiro 2015 e janeiro 2017	57
Figura 33 -	Composição material da amostra Fluff miúdo (entre 4 e 50mm) - %wt	58
Figura 34 -	Distribuição de granulometria da amostra de Fluff miúdo analisada	59
Figura 35 -	Composição material da amostra de Fluff por granulometria - wt%	60
Figura 36 -	Peneiramento do Fluff em diversas faixas granulométricas.	61
Figura 37 -	Comparação do Poder Calorífico Superior do Fluff em base seca com o de outros combustíveis sólidos	64

Figura 38 -	Gráfico relacionando o teor (%) de plástico no Fluff versus Poder Calorífico Superior (kJ/kg) em base seca. Em vermelho linha de tendência positiva	67
Figura 39 -	Gráfico relacionando o teor (%) de finos no Fluff versus Poder Calorífico Superior (kJ/kg) em base seca. Em vermelho linha de tendência negativa.....	67
Figura 40 -	Fluxograma das rotas do processo siderúrgico. Em destaque, o forno de reaquecimento de tarugos para a laminação.....	69
Figura 41-	Esquema geral da região interna do forno de reaquecimento de tarugos para a laminação	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Exemplo de resultados de uma análise elementar	35
Tabela 2 –	Balanço de massa da planta Shredder durante mês do estudo	55
Tabela 3 –	Balanço de massa referente a um dia, feito em uma planta Shredder no Rio Grande do Sul	56
Tabela 4 –	Resultados das análises imediatas em cada amostra do Fluff (base úmida)	62
Tabela 5 –	Apresentação dos resultados da análise imediata do Fluff em base seca e base úmida	63
Tabela 6 –	Valores para o Poder Calorífico Superior Encontrados no presente trabalho.....	64
Tabela 7 –	Tabela comparativa de composição, poder calorífico (base seca) e análise imediata do Fluff em diversos trabalhos	66
Tabela 8 –	Comparação da Análise Imediata do Fluff obtida no presente trabalho com os parâmetros obtidos para o Carvão e Biomassa na literatura	68
Tabela 9 –	Parâmetros assumidos e resultados obtidos da simulação do uso da queima direta do Fluff para redução do consumo de gás natural no forno de reaquecimento da laminação	70
Tabela 10 –	Parâmetros assumidos para o cálculo do gasto anual com destinação do Fluff a aterros	71

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização do problema	13
1.2	Objetivo geral	16
1.3	Objetivos específicos	16
1.4	Apresentação da monografia	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1	Processo de fusão de sucata metálica em fornos elétricos a arco	22
3.2	Processamento de sucata metálica em plantas Shredder	25
3.3	Separação no Eddy-Current	30
3.4	Combustíveis sólidos	33
3.5	Caracterização dos combustíveis sólidos	34
3.6	Composição dos combustíveis sólidos	34
3.6.1	Análise elementar	34
3.6.2	Análise imediata	35
3.6.3	Poder calorífico	37
3.6.4	Granulometria	38
3.7	Técnicas para conversão do Fluff em energia	39
3.7.1	Queima direta	40
4	METODOLOGIA	41
4.1	Levantar informações sobre a composição física do Fluff gerado no Shredder de uma indústria siderúrgica	41
4.1.1	Coleta do material	41
4.1.2	Separação por granulometria e tipo de material	42
4.2	Realizar estudos experimentais de poder calorífico em amostras de Fluff através de uma bomba calorimétrica	44
4.3	Realizar uma avaliação termogravimétrica do Fluff pelo método de análise imediata, utilizado um forno mufla	47

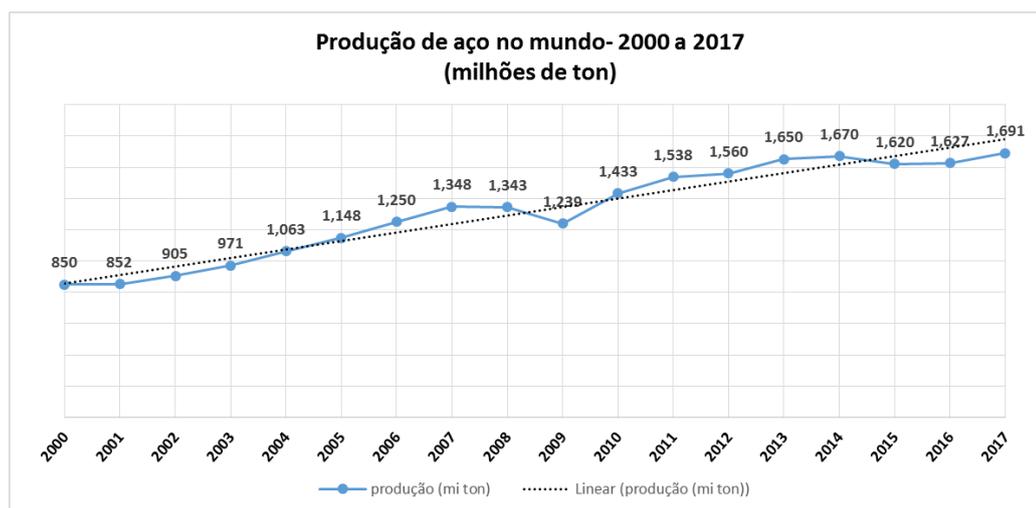
4.3.1	Procedimentos de uma análise imediata	48
4.3.2	Apresentação dos dados	50
4.4	Calcular as incertezas	51
5	RESULTADOS	54
5.1	Balanço de massa	54
5.2	Resultados da Caracterização Gravimétrica	58
5.3	Resultados da Análise Imediata	61
5.4	Resultados da análise do Poder Calorífico Superior (PCS)	63
5.5	Comparação dos resultados obtidos com dados da literatura	65
5.6	Sugestão de aplicação para o Fluff em processo interno da planta	68
5.6.1	Forno de reaquecimento de tarugos para a laminação	68
6	CONCLUSÕES	72
6.1	Trabalhos Futuros	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

As usinas siderúrgicas semi-integradas têm como matéria-prima básica a sucata sendo grande consumidora de energia e de materiais, sendo responsável por um significativo volume de resíduos sólidos, além de efluentes líquidos e gasosos. Em 2009, o setor siderúrgico brasileiro gerou cerca de 19 milhões de toneladas de resíduos e coprodutos em usinas integradas e semi-integradas, resultando em uma proporção de 640 kg de resíduos por tonelada de aço produzida (RECKZIEGEL, 2012). Cabe destacar que a nas últimas décadas houve um aumento crescente na produção mundial de aço segundo (WORLDSTEEL ASSOCIATION), como mostrado na Figura 1 causando, dessa forma um aumento proporcional na geração dos resíduos decorrentes da atividade siderúrgica.

Figura 1- Produção Mundial de aço em milhões de toneladas

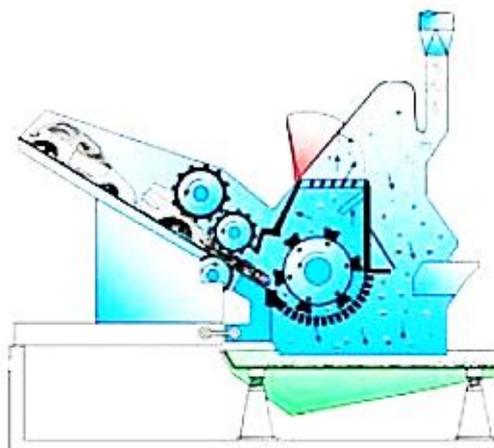


Fonte: (WORLDSTEEL ASSOCIATION)

Para atender essa produção os equipamentos trituradores de sucata e/ou “Shredder” se tornam cada vez mais necessários. O Shredder, Figura 2, é composto por um moinho com um conjunto de martelos que permitem que a sucata seja triturada em pedaços pequenos e de alta densidade. Além disso, o Shredder é também equipado com sistemas de separação que permitem retirar da sucata, já triturada, o material não ferroso (como terra, metais não ferrosos, madeira, plástico e borracha)

fazendo com que o produto final seja além de um material de alta densidade também um produto com baixa quantidade de não ferrosos (SOUZA, 2015).

Figura 2 - Ilustração de sucata sendo processada no Shredder

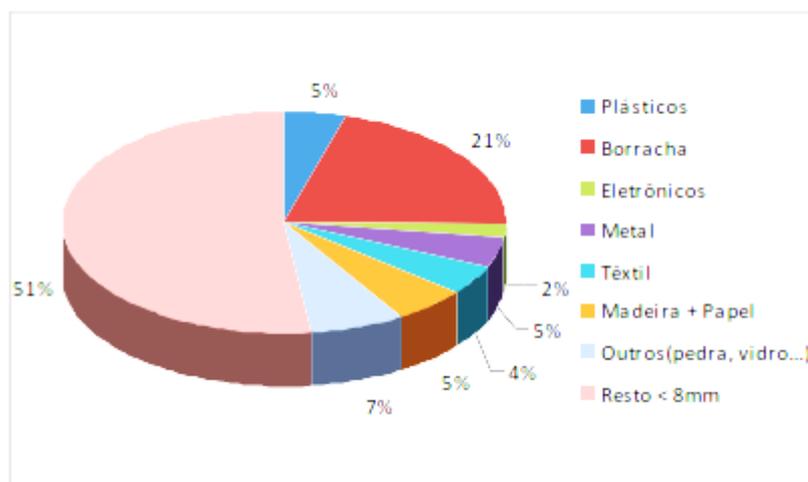


Fonte: (SOUZA, 2015)

O resíduo gerado pela trituração da sucata em plantas Shredder consiste em vidro, borracha, fibras, plásticos, finos e outros materiais que permanecem após o metal ferroso ser direcionado para o forno. Os metais não ferrosos (materiais paramagnéticos), como alumínio e cobre, são separados pelo sistema que aplica o efeito Eddy Current e são posteriormente comercializados. Além destes materiais, tem-se, a terra que é comercializada para fábricas de cimento, pois possui propriedades adequadas para a utilização como insumo. Por último, o Fluff, nome dado à fração de materiais mais leves como plásticos, madeiras, borrachas entre outros que compõe o Resíduo do Shredder e atualmente estão sendo largamente destinados a Aterro Sanitário - Classe 2 (não perigosos). A disposição desses resíduos remanescentes em aterros gera impacto ambiental e onera o custo de produção do aço (PORTAL WENDTCORP, 2016).

O Fluff, obtido principalmente da sucata automobilística, é bastante heterogêneo, como ilustrado na Figura 3, podendo variar significativamente de uma hora para outra dentro de uma mesma planta Shredder, seja em composição, grau de contaminação (como PVC, cloretos, metais, óleos e baterias), umidade e capacidade energética. Essa flutuação é devida a variações nas práticas de separação por meio da operação, condições climáticas e o tipo de sucata alimentada: automobilística, industrial, eletrodomésticos etc. (MANCINI, TAMMA e VIOTTI, 2010).

Figura 3 - Distribuição de materiais no Fluff com granulometria > 2mm



Fonte: (RECKZIEGEL, 2012)

De composição bastante variável, o Fluff consiste principalmente de materiais combustíveis de alto poder calorífico, apesar disso, o destino de grande parte desses resíduos ainda é o aterro industrial. Entretanto, a medida que o custo de aterramento aumenta vertiginosamente e as legislações, cada vez mais rígidas, forçam que os Resíduos do Shredder não sejam destinados a aterros, novas tecnologias vão sendo desenvolvidas para destinar esse resíduo de forma sustentável tanto em termos ambientais quanto econômicos (MANCINI, TAMMA e VIOTTI, 2010) .

Existem várias tecnologias para conversão de resíduos em energia, incluindo refino de óleo residual, pirólise de plástico, recuperação de calor residual e combustível a partir de resíduo sólido. Principais vantagens dessas tecnologias são comercialização em um curto período e tratamento de resíduos ao enquanto faz a recuperação de energia. A obtenção de combustível a partir de resíduo sólido pode ser feita de várias fontes, incluindo resíduos sólidos municipais, plástico, madeira etc. O combustível obtido a partir de resíduo sólido também pode ser usado como combustível auxiliar de combustível fóssil para caldeiras industriais, fábricas de cimento e plantas sucroalcooleiras (PARK et al.2016).

Além do impacto ambiental, a destinação do Fluff à aterros onera bastante o custo de produção do aço. De acordo com Reckziegel (2012), o balanço de uma corrida de operação do triturador de sucata, são gerados em torno de 227kg de Resíduo de Shredder para cada tonelada de sucata processada, ou seja, cerca de 23% da sucata se torna resíduo. Considerando um valor para destinação ao aterro de

R\$ 63,00 por tonelada de sucata processada e uma capacidade de processamento do Shredder de 120 ton/h temos um custo anual de cerca de R\$ 5 milhões. Boughton e Horvath (2006), afirmam que mais de 3 milhões de toneladas de resíduo de Shredder são produzidas por ano nos Estados Unidos e destinadas a aterros.

Dessa forma, justifica-se uma melhor destinação para esse resíduo, sendo o aterro sanitário a pior opção. Para avaliar a possibilidade do aproveitamento energético do Fluff são necessárias análises das características térmicas incluindo análise da composição, análise do Poder Calorífico Inferior (PCI) e granulometria para então, comparando os resultados das análises de características diferentes do Fluff com outros combustíveis, poder avaliar a viabilidade do Fluff como combustível alternativo (PARK et al.2016).

1.2 Objetivo geral

Realizar a caracterização físico-química do resíduo sólido tipo Fluff gerado em um triturador de sucata de uma planta siderúrgica no Recife e avaliar o aproveitamento do material como insumo energético.

1.3 Objetivos específicos

- Levantar informações sobre a composição física do Fluff gerado no Shredder de uma indústria siderúrgica.
- Realizar uma avaliação termogravimétrica do Fluff pelo método de análise imediata, utilizado um forno mufla.
- Realizar estudos experimentais de poder calorífico em amostras de Fluff através de uma bomba calorimétrica.
- Comparar os resultados obtidos com os resultados alcançados em outros trabalhos, em outras plantas de diferentes países.

- Analisar prováveis aplicações para o Fluff como complemento energético em processos internos da planta siderúrgica.

1.4 Apresentação da monografia

Este trabalho possui seis capítulos com a seguinte distribuição: Introdução; Fundamentação teórica; Revisão bibliográfica; Metodologia; Resultados e discussões; Conclusão.

A introdução é o primeiro capítulo deste trabalho. Este capítulo tem a função de mostrar como o trabalho será estruturado, qual a justificativa para sua elaboração e quais os seus objetivos gerais e específicos.

A revisão bibliográfica (capítulo 2) apresenta a evolução do estado da arte referente aos temas abordados neste trabalho.

O capítulo de fundamentação teórica (capítulo 3) tem por objetivo apresentar a base conceitual que será necessária para a compreensão dos capítulos posteriores. O capítulo de metodologia (capítulo 4) mostra e explica todos materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos listados no capítulo de introdução.

O quinto capítulo diz respeito aos resultados e discussões deste trabalho. Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com o uso da metodologia e é realizada uma discussão acerca desses resultados. Por fim, no capítulo 6 são feitas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A reciclagem de aço a partir de automóveis, eletrodomésticos e outras sucatas metálicas é feita através de operações de trituração dedicadas (as Plantas Shredder). O resíduo de Shredder, também conhecido como Fluff é um material bastante heterogêneo formado por vidro, plástico, borracha e outros materiais que permanecem após o metal ferroso e não ferroso ser removido, compondo cerca de 25% em peso do material produzido em plantas Shredder (KHODIER, WILLIAMS e DALLISON, 2017) . Segundo Boughton e Horvath (2006), mais de 3 milhões de toneladas desse resíduo são geradas por ano nos Estados Unidos e destinadas à aterros sanitários.

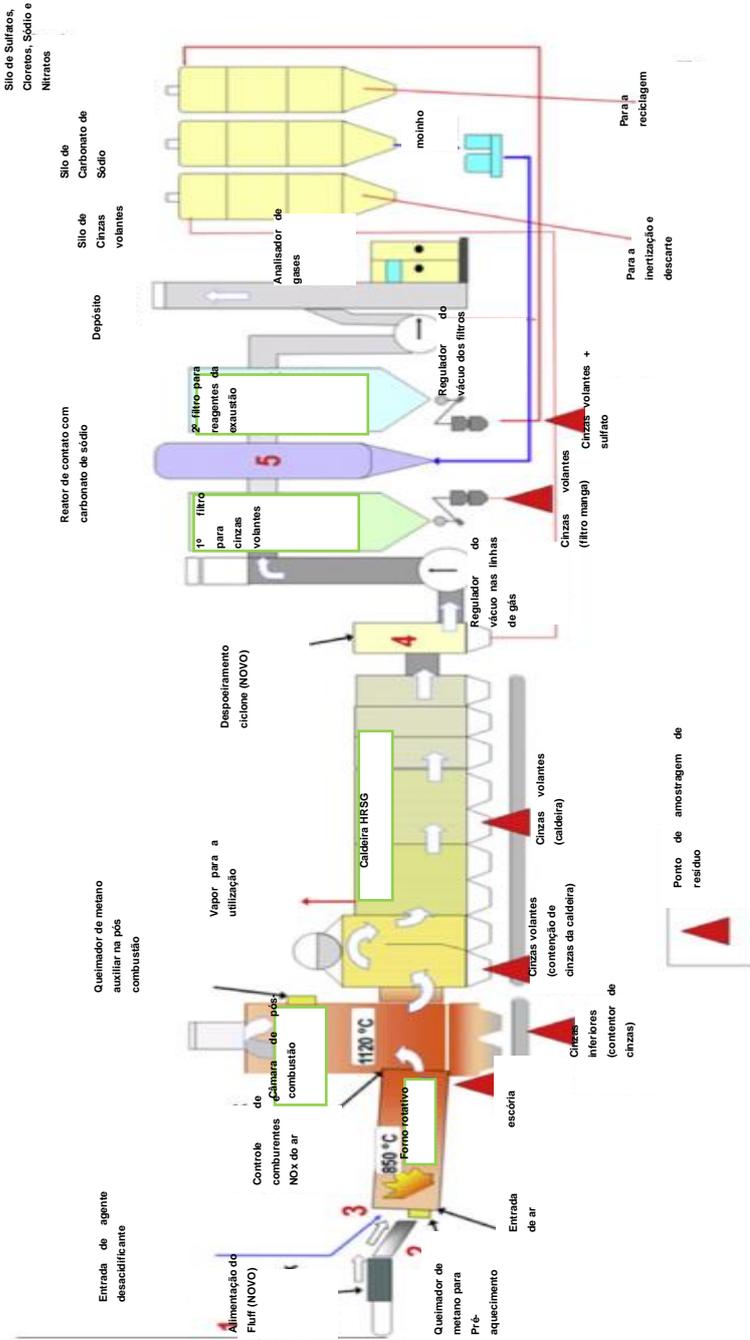
No ano 2000 o parlamento europeu e o conselho da união europeia, lançaram a Diretiva 2000/53/EC a qual previu um aumento da taxa de reutilização e recuperação da sucata automobilística em 95% até 2015. Essa diretiva aumenta drasticamente a pressão sobre todas as partes interessadas em desenvolver soluções alternativas ao aterro para o Fluff, visando maior recuperação de materiais e energia, além de redução de poluentes. (MANCINI, TAMMA e VIOTTI, 2010)

Nesse sentido, Boughton e Horvath (2006), fizeram uma análise de ciclo de vida, considerando impactos como acidificação, aquecimento global e intoxicação de humanos e do meio ambiente, chegando ao resultado de que o Fluff possui grande potencial energético e o uso dele como combustível complementar e suplemento mineral na fabricação de cimento pode levar a uma redução de 30 a 75% dos impactos atuais.

Mancini, Tamma e Viotti (2010) conduziram um experimento de gaseificação e incineração do Fluff em uma planta em escala real, que antes usada para termo valorização de pneus, agora foi adaptada para a queima do resíduo de Shredder. Mancini, Tamma e Viotti (2010) obtiveram dados das propriedades de combustão de diferentes configurações de Fluff, assim como análise elementar e dos contaminantes metálicos. Mancini et al. (2014) realizaram novamente o experimento otimizando alguns pontos operacionais e de gerenciamento do processo, como: (1) redução dos finos no Fluff; (2) substituição da esteira de alimentação por uma rosca; (3) melhoria na selagem do forno; (4) introdução de um ciclone antes do ventilador principal e (5) aumento da taxa de injeção de carbonato de sódio para contrapor as emissões mais altas de HCl no forno como mostrado na . Além disso, o trabalho mostrou que o

processo é satisfatório no ponto de vista de recuperação energética e liberação de contaminantes na atmosfera, e recomendou uma preparação inicial do Fluff para a retirada de finos antes do tratamento térmico.

Figura 4 - Layout da nova planta de combustão. Os números vermelhos indicam as melhorias no processo



Fonte: Adaptado de Mancini et al. (2014)

O trabalho desenvolvido em Morselli et al. (2010) trata da caracterização do resíduo de Shredder de uma planta industrial na Itália. Os resultados mostram que quase metade do resíduo é composto por finos e o restante, principalmente por polímeros. A fração fina (abaixo de 20mm) é a mais contaminada por óleos e metais pesados, produzindo grande quantidade de cinzas e com baixo poder calorífico. Como consequência, o Fluff precisa ser tratado, em processos como peneiramento ou pirólise antes de ser utilizado como combustível.

Reckziegel (2012) realizou uma caracterização do Fluff de uma usina siderúrgica em Porto Alegre. Nesse trabalho, as amostras do resíduo foram divididas em duas categorias: abaixo de 2mm (finos) e acima de 2mm (gráudo). A fração de finos, é rica em óxidos e compatível com o uso na indústria cimenteira, enquanto a fração maior que 2mm, rica em compostos poliméricos a base de carbono, tem alto poder calorífico, 3781 kcal/kg, sendo indicada para a produção de energia.

Também influenciados pela Diretiva 2000/53/EC, Cossu et al. (2014) desenvolveram um trabalho de revisão dos artigos existentes sobre a caracterização e gerenciamento do Fluff na Itália, consolidando as características físico-químicas e as práticas de processamento do Fluff estudadas, com foco no aprimoramento da recuperação de materiais secundários. Segundo Cossu et al. (2014), por conta da extrema heterogeneidade do Fluff, não se pode assumir de imediato que processos de recuperação energética ou de material desenvolvidos para uma planta Shredder possam ser usados em outra planta. Além disso, embora o Fluff possua propriedades energética interessantes, ele precisa ser tratado para prevenir o alto teor de materiais tóxicos tais como cloro e metais pesados. Cossu e Lai (2015) realizaram um segundo overview desse assunto, concluindo que para atingir os objetivos da diretiva, uma combinação de reciclagem e recuperação de energia é necessária, sendo a destinação ao aterro a opção menos favorável.

Park et al. (2016) conduziram um estudo sobre o aproveitamento energético do resíduo sólido tipo Fluff na Coreia, utilizando amostras de outras categorias biomassa (cascas de frutas) e combustível fóssil (carvão betuminoso da china). As amostras do Fluff foram trituradas para uma análise mais confiável e com isso, foram conduzidas análises das características térmicas dessas amostras, incluindo análise imediata, poder calorífico e análise elementar. Comparando com o carvão betuminoso, o Fluff possui menor teor de carbono e maior de voláteis. Apesar de possuir um poder

calorífico inferior de 3,5MJ/kg, similar ao da biomassa, foi identificado alto teor de cloro (0,7%) e um conteúdo de umidade elevado (25,36%). Dessa forma, em concordância com os trabalhos anteriores, Park et al. (2016) concluíram que para o aproveitamento térmico do Fluff se fazem necessários processos de pré-secagem desse resíduo assim como controle dos cloretos (os quais geram substâncias tóxicas em processos térmicos).

Ramos e Paula et al. (2011) analisaram diferentes resíduos de biomassa vegetal em Minas Gerais, caracterizando-os como potenciais para produção de energia. Com os resultados das análises elementares e imediatas de diversas amostras de biomassa vegetal, Ramos e Paula et al. (2011) correlacionaram o poder calorífico com o conteúdo de voláteis, carbono, oxigênio e hidrogênio.

Notarnicola et al. (2017) estudaram a pirólise do Fluff em um forno rotativo de bancada separando as amostras por granulometria (A: menor do que 30mm e B: maior que 30mm). Foi analisado o efeito da temperatura de pirólise na geração dos produtos (óleo, gás e carvão). Além disso foi realizada a caracterização morfológica, análise imediata, análise elementar, poder calorífico e teor de metais tanto do carvão quanto do resíduo de Shredder, obtendo valores semelhantes para as amostras A e B. Além disso, foi feita caracterização do óleo gerado e do gás de síntese. Nesse estudo, concluiu-se que o baixo teor de umidade (média 1,13%), junto ao grande poder calorífico (média 20,35 MJ/kg), define o Fluff como uma matriz interessante para os tratamentos térmicos.

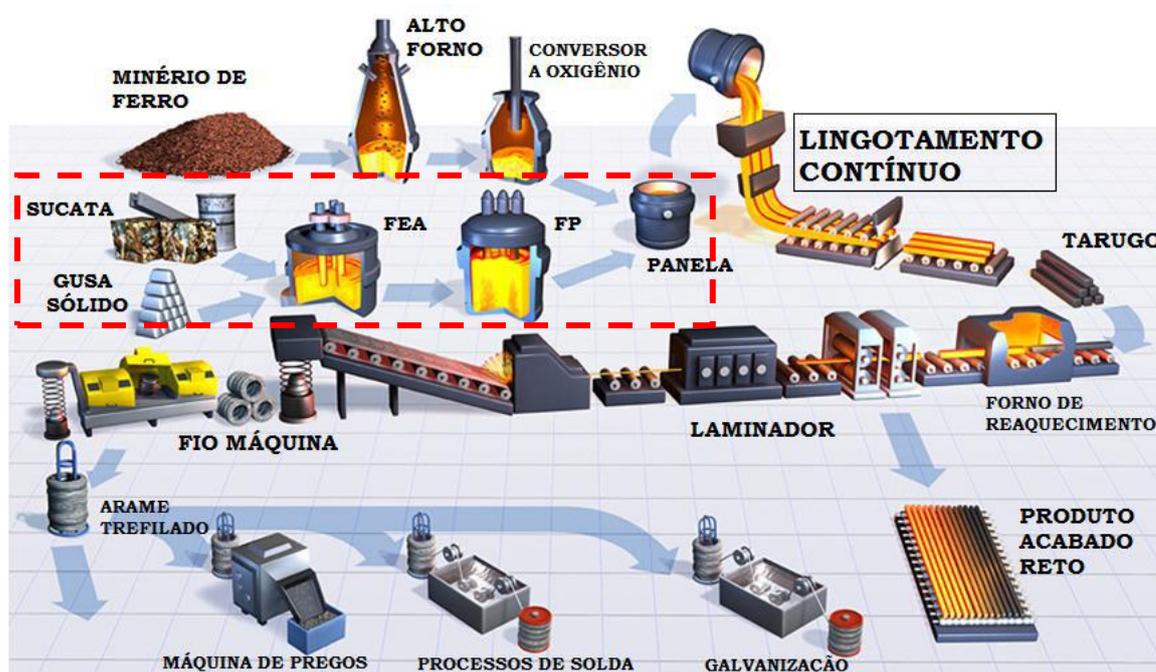
No estudo conduzido no Reino Unido por Kohdieer, Williams e Dallison (2017) foi analisado o carvão gerado no processo de pirólise do Fluff em um forno rotativo em escala piloto. Foi determinada a composição química do carvão, o poder calorífico e os fatores críticos no processamento. O poder calorífico máximo foi no carvão gerado à uma temperatura de pirólise de 800°C. Nessa temperatura os resultados encontrados para o PCS foram de 17 a 27MJ/kg para o carvão fino (abaixo de 20mm) e de 2 a 4MJ/kg para o graúdo (acima de 20mm) enquanto o Fluff analisado possui um PCS variando entre 16 e 32MJ/kg. Dessa forma, enquanto o carvão fino tem alto potencial energético, carvão graúdo, possui baixo poder calorífico e alto teor de metais, dificultando seu uso energético, mas possibilitando o seu uso como material para construção. Além disso, foi apresentado que o pré tratamento do Fluff (trituração e peneiramento) levou a um baixo teor de cobre e cloro no carvão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Processo de fusão de sucata metálica em fornos elétricos a arco

Dentre as rotas de fabricação de produtos siderúrgicos, as usinas semi-integradas ou mini-mills com aciarias elétricas respondem por 30% da produção mundial de aço (AIST, 2014). Nas aciarias elétricas, os fornos elétricos a arco (FEA) fundem predominantemente sucata para produzir aço, utilizando-se um arco elétrico de alta potência gerado por eletrodos de grafite. A Figura 5 apresenta um fluxograma simplificado do processo siderúrgico.

Figura 5 - Fluxograma das rotas do processo siderúrgico. Em destaque, a rota semi-integrada

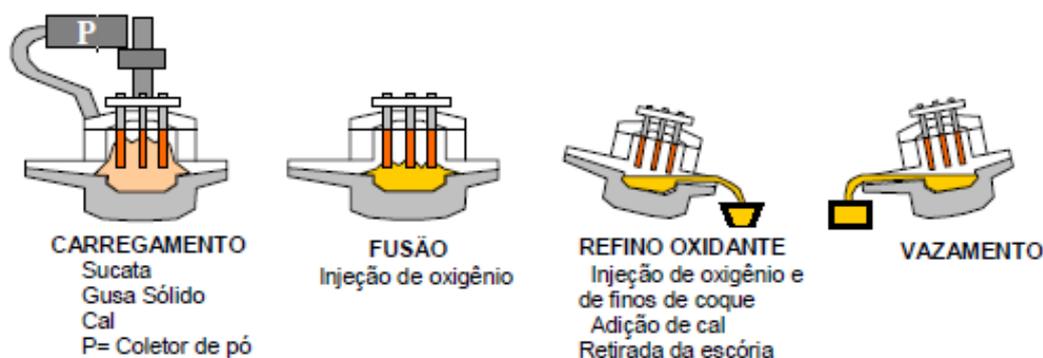


Fonte: (GERDAU, 2017)

O principal objetivo do forno elétrico à arco é fundir a sucata o mais rápido possível, obtendo-se aço líquido a ser tratado nos processos de refino secundário subsequentes. Portanto, as usinas semi-integradas são aquelas cujo aço é obtido a partir de ferro secundário, isto é, a matéria prima é a sucata de aço, não ocorrendo redução do minério de ferro, posicionando esta rota como importante recicladora de aço (MOURÃO, 2007).

O forno elétrico à arco opera como um processo de fusão por bateladas (também denominado corridas), produzindo aço líquido. O ciclo de operação de um FEA, denominado “tap-to-tap”, é formado pelas seguintes operações: carregamento de sucata no forno, fusão e refino, retirada de escória e vazamento (JONES, 1998). A Figura 6 apresenta as etapas do processo.

Figura 6 - Etapas do processo de fusão da sucata em um forno elétrico a arco (FEA)



Fonte: (GERDAU, 2017)

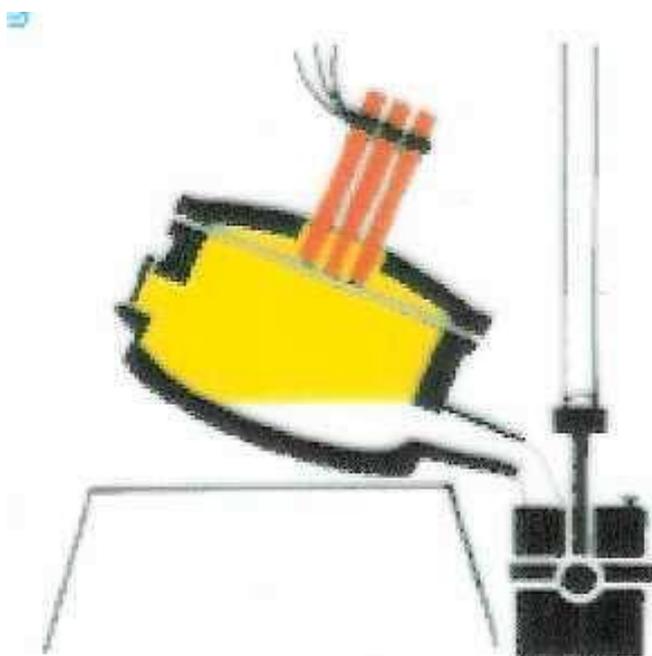
O carregamento consiste em carregar a sucata que está dentro dos cestões no FEA. A etapa de preparação do cestão no Pátio é bastante crítica, pois uma boa estratificação da carga fria garante as condições químicas e as condições necessárias para uma boa fusão.

A etapa de fusão é a mais importante na operação dos fornos elétricos à arco. A fusão da sucata metálica é obtida ao fornecer energia ao forno, basicamente energia elétrica e energia química. Energia elétrica é fornecida por meio dos eletrodos de grafite e é normalmente a maior parcela de energia nas operações de fusão. A energia química, por sua vez, é fornecida de diversas formas, como através de queimadores e reações químicas promovidas pela injeção de combustível e oxigênio (SOUZA, 2015)

Na etapa de refino, a reação do oxigênio do FeO com o carbono irá auxiliar na formação de uma escória espumante que irá cobrir o arco e proteger a superfície interna do forno, ao mesmo tempo em que uma grande quantidade de energia ficará retida na escória e será transferida para o banho, aumentando a eficiência de energia. Uma grande parte do monóxido de carbono será direcionada ao sistema de despoeiramento.

Após carregamento, fusão e refino oxidante acontece a etapa de vazamento (Figura 7). Essa fase do processo consiste em verter o aço líquido, nas condições metalúrgicas adequadas, para uma panela de refratário.

Figura 7- Ilustração de um vazamento e adição de ligas em uma panela

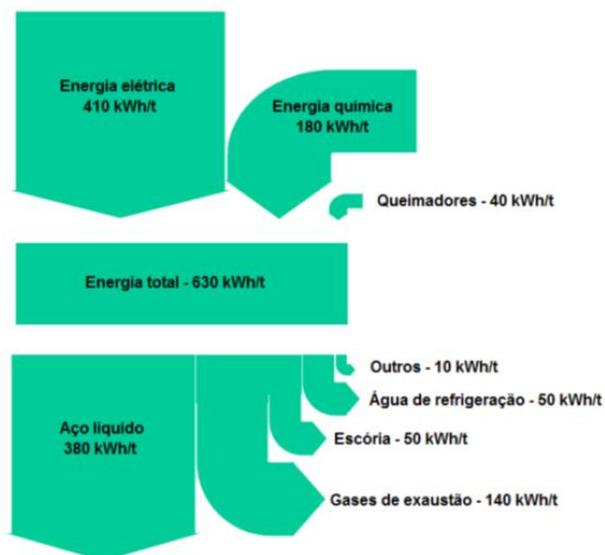


Fonte: (SOUZA, 2015)

Após o vazamento da corrida na panela essa é encaminhada para o forno panela onde serão corrigidas suas características químicas e a temperatura, ou seja, as condições metalúrgicas, e em seguida serão encaminhadas ao lingotamento contínuo.

A eficiência energética média de um FEA normalmente é de 55 a 65%, com o consumo de energia ocorrendo de diferentes formas (EPE , 2009). A Figura 8 apresenta um balanço energético a partir do qual é possível visualizar a composição média do consumo total de energia em um FEA. O diagrama mostra as fontes energéticas de entrada em um FEA, tanto elétrica quanto química, e as fontes energéticas de saída, considerando-se as parcelas de energia efetivamente utilizadas para fundir e aquecer o aço e as parcela não aproveitadas.

Figura 8- Balanço energético em um Forno Elétrico a Arco (FEA)



Fonte: (ROSSI, 2014)

As plantas semi-integradas são uma parcela representativa no mercado, quando se trata da fabricação do aço, com isso, o uso intensivo da sucata passa a ser uma realidade para grande parte da produção siderúrgica mundial. Além disso, essas Usinas exercem um papel extremamente relevante na sociedade, reciclando material de obsolescência, o que fortalece a importância ambiental desse processo, adicionando à importância econômica e social que compõe a cadeia de suprimentos metálicos (catadores, sucateiros, cooperativas etc.). (SOUZA, 2015)

3.2 Processamento de sucata metálica em plantas Shredder

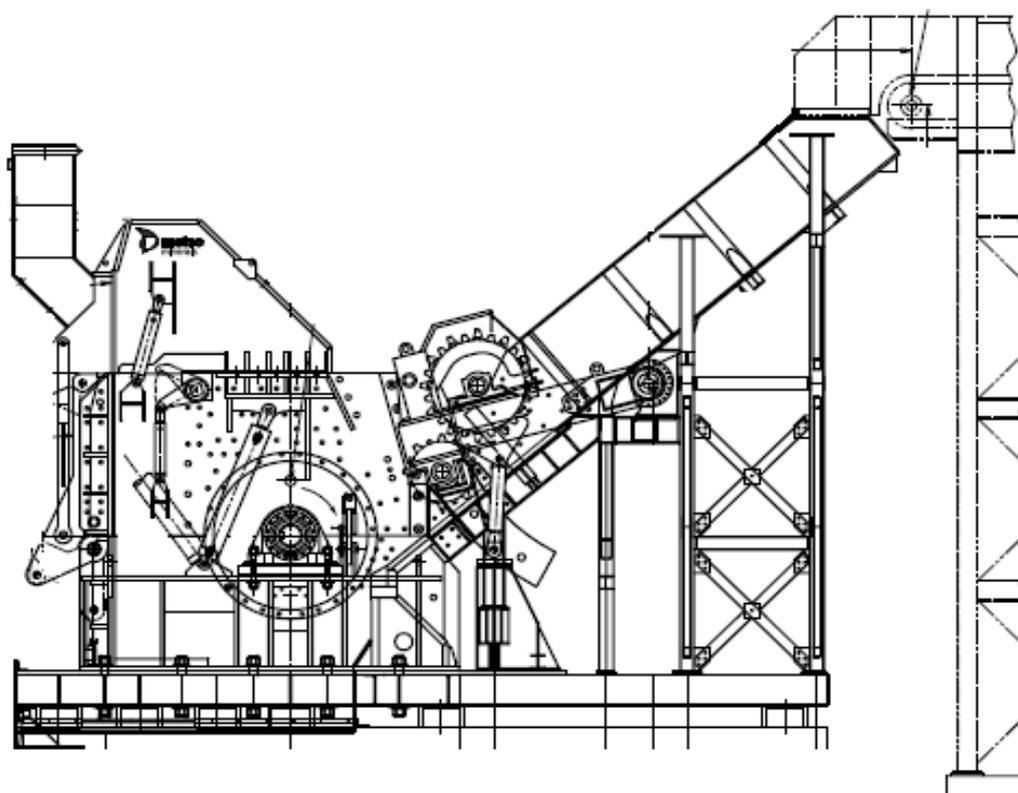
O aço é o produto mais reciclável e reaproveitado do mundo. Quando finda sua vida útil, todos os produtos podem tornar-se sucata e retornar aos fornos. As usinas siderúrgicas semi-integradas têm como principal matéria prima essa sucata sólida. (GERDAU, 2017).

Entende-se como sucata os materiais que deixam de ser úteis à sociedade, como fogões, geladeiras e carros velhos. Esses materiais são reaproveitados e transformados em novos produtos de aço. A sucata gerada pela sociedade é transportada das fontes geradoras para as Usinas onde são classificadas segundo sua origem, dimensão, peso e material. Após classificadas, as sucatas são destinadas

e armazenadas em locais específicos para serem utilizadas ou processadas para depois serem enviadas aos cestões e em seguida fundidas dentro das Aciarias.

Sendo a sucata um insumo empregado em grande quantidade e com alto valor agregado, é de interesse que ela chegue ao forno elétrico à arco (FEA) para fusão com dimensões adequadas para evitar a ocorrência de interrupções e melhorar o rendimento do processo. Um dos processos de beneficiamento da sucata é a trituração, o qual consiste em inserir as sucatas em trituradores denominados Shredder, que de maneira sucinta trata-se de um moinho de martelos, com potência entre 3.000 e 8.000 HP, ilustrado na Figura 9. O Shredder fragmenta a sucata e em seguida efetua a separação da parte ferrosa e não ferrosa do material triturado, seja por separação de granulometria nas grelhas e peneiras, seja por separação magnética para recuperar materiais ferrosos ou até mesmo o uso do efeito “Eddy Current” para recuperar metais não ferrosos. Esse processo, representado na Figura 10, gera o que aqui estamos denominando de sucata triturada.

Figura 9- Desenho do Moinho do Shredder



Fonte: (GERDAU, 2018)

Figura 10 - Visão do processo de trituração da sucata no Shredder.

Quadro A; Seleção da sucata a ser empregada no Shredder. Quadros B e C: Veículos sendo empregados para triturar. Quadro D: Sucata triturada ao final do processo



Fonte: (SOUZA, 2015)

Entre as diversas vantagens do uso de sucata triturada nas Aciarias estão a elevada densidade e o baixo grau de não ferrosos, o que, em teoria, aumenta o rendimento metálicos, diminui a geração de escórias, o consumo de energéticos e de eletrodos no Forno Elétrico a Arco. (SOUZA, 2015)

Algumas vantagens no processo de fusão de material obtidas com a utilização da sucata triturada pelo Shredder, segundo Mr. Scott Newell (inventor da máquina de trituração), são:

1. Melhor rendimento do processo de fusão devido ao baixo número de impurezas, proporcionado pelo processo de trituração.
2. Composição química mais uniforme da carga fria, pois há uma tendência de se utilizar uma quantidade significativa desse material (cerca de 60%), cujos não

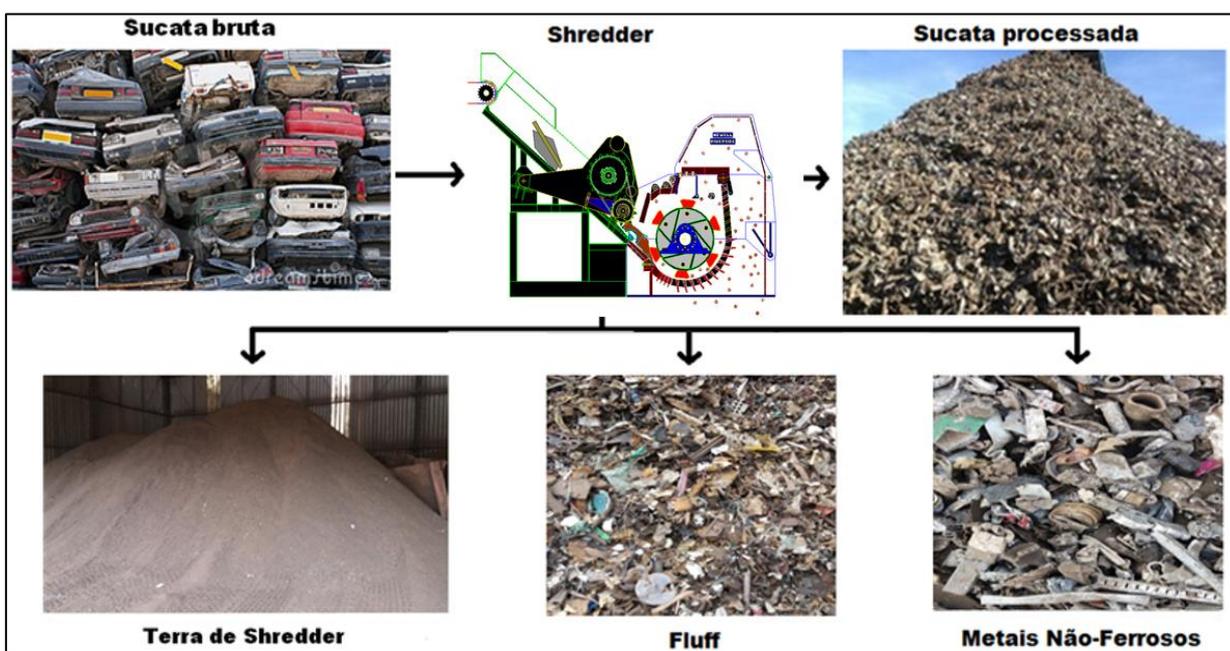
ferrosos estão em pequenas quantidades, graças às separações com rolos magnéticos e Eddy Current.

3. Menor índice de quebra dos eletrodos, pois, como a sucata é mais compacta e uniforme, praticamente não há acomodação de carga dentro do forno, evitando assim o choque mecânico da carga com os eletrodos, um dos principais fatores de quebra.

4. Menor consumo de refratários, principalmente na linha de escória. Há uma menor quantidade de sílica na sucata o que gera uma tendência de aumentar a basicidade da escória e conseqüentemente a agressão aos refratários também seja reduzida. (SOUZA, 2015)

Outra vantagem do processamento de Sucata através de uma planta Shredder, é a possibilidade de se obter receita com coprodutos com os materiais separados e as respectivas granulometrias como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Processo de trituração de sucata e os resíduos gerados

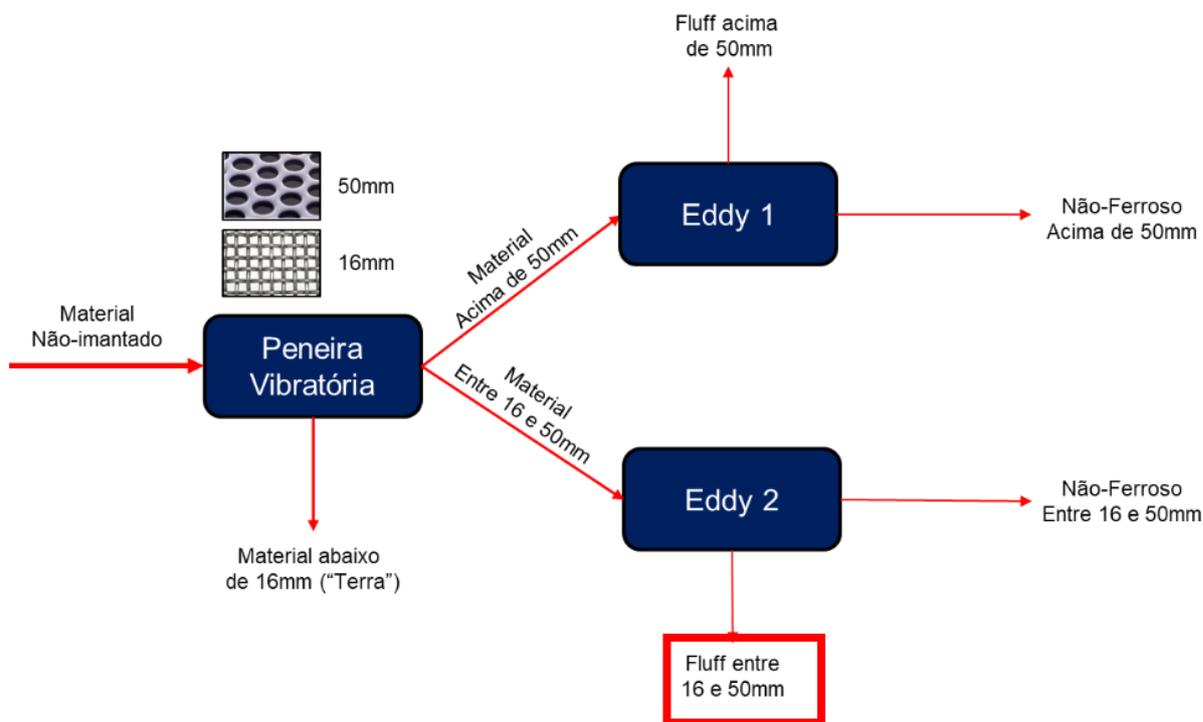


Fonte: Autor

O processo de separação dos diversos materiais durante processamento no Shredder pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- a) A sucata, é classificada conforme o material, dimensões e configuração (Sucata mista, sucata de Ferro Fundido, Sucata prensada, emaranhado etc.) para então ser alimentada no Shredder.
- b) A sucata passa primeiro por rolos compactadores que regulam a vazão de entrada no moinho assim como a dimensão das peças que entram. No moinho, as peças são trituradas pelo impacto dos martelos que empurram a sucata contra a bigorna, cisalhando a mesma. A sucata continua a ser triturada até que esteja pequena o suficiente para passar pelas grelhas e cair no alimentador vibratório e em seguida na esteira.
- c) Após trituração no moinho, a sucata passa por tambores magnéticos que fazem a separação da fração ferrosa da não ferrosa; a fração ferrosa está pronta para ser utilizada nos fornos da aciaria, enquanto a não ferrosa segue por outra esteira para a separação.
- d) A fração não magnética passa ainda por mais algumas separações magnéticas (extrator magnético e polia magnética) e, em seguida, pelo processo de separação por peneira vibratória que divide o material em três granulometrias diferentes, como ilustrado na Figura 12:
 - a. $X > 50\text{mm}$: material graúdo direcionado para a mesa vibratória do primeiro Eddy Current.
 - b. $16 < X < 50\text{mm}$: material de dimensão intermediária que é direcionado para o segundo Eddy Current de forma a fazer a separação dos metais não ferrosos do material não metálico.
 - c. $X < 16\text{mm}$: Porção do material direcionada a baia de terra.

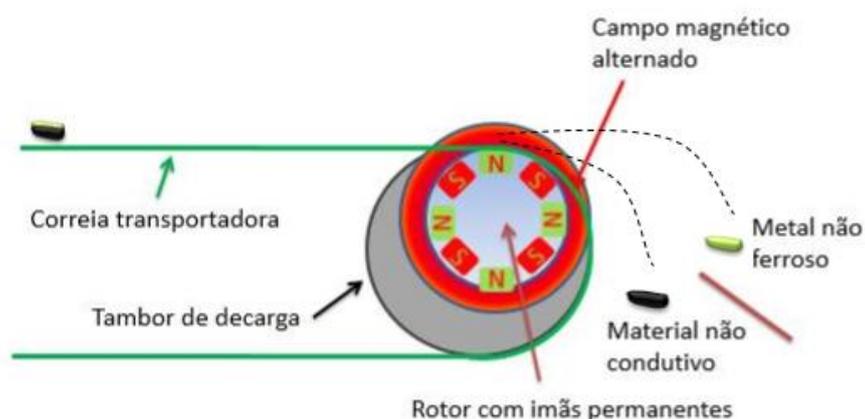
Figura 12 - Processo de separação do Fluff por granulometria (Em destaque, a fração do material estudada no presente trabalho)



Fonte: Autor

3.3 Separação no Eddy-Current

O equipamento conhecido como Eddy-Current, utiliza o princípio das correntes parasitas para diferenciar os materiais por condutividade elétrica, separando assim os metais não-ferrosos, como Al e Cu, dos demais como madeira, plásticos, tecidos, terra, etc. A rápida mudança no campo magnético induz as correntes parasitas nos metais não ferrosos, acelerando os mesmos para longe do campo. Um defletor é utilizado para separar os materiais metálicos dos não metálicos em sua trajetória, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Representação de funcionamento do Eddy Current

Fonte: Autor

Os parâmetros controlados no Eddy Current são a velocidade da esteira, a velocidade de rotação do sistema de polos (velocidade de variação do campo magnético), a inclinação do sistema de polos e, por fim, o ângulo de inclinação do defletor que influencia na pureza e na quantidade. Está representada na Figura 14 a relação entre esses parâmetros e o grau de pureza (G_{AL} , G_{nf}) e grau de recuperação (R_{AL} e R_{nf}) de alumínio e dos metais não ferrosos contidos na sucata respectivamente com uma configuração do defletor $(x, y) = (0,187; 0,069)$ m.

Figura 14 - Resultados experimentais para o grau de pureza e recuperação do alumínio e dos não ferrosos no produto a partir dos resíduos do Shredder.

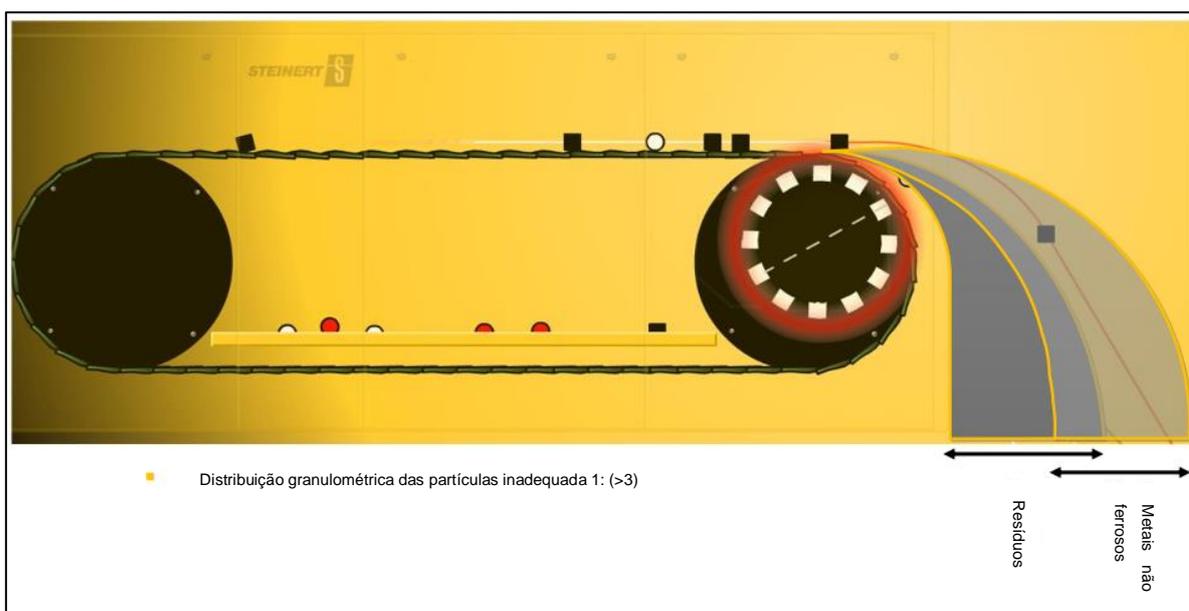
tambor	(rps)	esteira (m/s)	G_{AL}	R_{AL}	G_{nf}	R_{nf}
30		1.68	22.56	100.0	35.34	100.00
30		1.51	24.68	98.65	38.11	97.21
30		1.33	24.74	98.88	80.51	94.13
30		1.16	63.29	93.27	96.19	90.47
40		1.68	22.84	100.0	35.79	100.00
40		1.51	24.43	98.77	38.40	99.07
40		1.33	52.81	99.10	80.20	96.06
40		1.16	62.12	98.09	94.46	95.20
50		1.68	22.47	99.89	35.17	99.79
50		1.51	24.34	99.89	38.10	99.79
50		1.33	53.90	97.76	83.35	96.49
50		1.16	59.53	93.6	91.72	92.05

Fonte: Adaptado de Rem (1998)

Na separação de materiais através do Eddy Current a granulometria do material passante sobre o equipamento é um fator muito importante. Em se tratando de granulometria, o Eddy Current trabalha com sua eficiência máxima quando se obedece a relação de 1:3 entre as granulometrias mínima e máxima do material que está passando sobre o mesmo, como ilustrado na Figura 15.

Considerando-se que a menor partícula que passa sobre o equipamento seja de 16mm, a maior deveria ter 48mm. Por isso a importância da separação granulométrica nas peneiras vibratórias. (STEINERT , 2017).

Figura 15 - Representação dos efeitos de uma distribuição de granulometria inadequada na separação de metais por efeito Eddy Current



Fonte: Adaptado de STEINERT (2017)

O sistema que aplica o efeito Eddy Current separa os materiais não ferrosos (materiais paramagnéticos) como alumínio e cobre que são posteriormente comercializados com Zorba. Além destes materiais, tem-se, a terra que é comercializada para fábricas de cimento, pois possui propriedades adequadas para a utilização como insumo. Por último, o Fluff, nome dado à fração de materiais mais leves como plásticos, madeiras, borrachas entre outros que compõe o Resíduo do Shredder e atualmente, são destinados a Aterro Sanitário - Classe 2 (não perigosos) em diversas usinas. A disposição desses resíduos remanescentes em aterros gera

impacto ambiental e onera o custo de produção do aço (PORTAL WENDTCORP, 2017).

Nos últimos anos, tem-se conduzido estudos visando o reaproveitamento do Fluff como insumo energético surgindo como práticas mais vantajosas do que a disposição final em aterros, tanto em termos ambientais como econômicos (RECKZIEGEL, 2012).

3.4 Combustíveis sólidos

Os combustíveis são substâncias que em contato com um agente oxidante, normalmente oxigênio, sofrem uma reação química que libera energia térmica. Embora muitas substâncias possam apresentar esta característica, apenas algumas delas podem ser consideradas na prática como combustíveis com importância comercial e industrial. Assim, uma substância pode ser considerada como combustível se for abundante na natureza (ou fácil de produzir artificialmente); desprender suficiente quantidade de calor na queima e apresentar custos relativamente baixos de extração, produção e transporte.

Os combustíveis são compostos basicamente por Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre. O carbono, hidrogênio e enxofre oxidam na presença do oxigênio, sendo conhecidos como elementos químicos combustíveis e responsáveis diretos da qualidade do combustível.

O carbono representa uma fração alta na composição dos combustíveis (de 50 a 75% em combustíveis sólidos) e tem alto poder calorífico (34 MJ/kg), ficando atrás apenas do hidrogênio, que possui poder calorífico de 120 MJ/kg, mas representa apenas 2 a 4% da composição dos combustíveis sólidos. O enxofre, por sua vez, possui baixo poder calorífico (9,3 MJ/kg) e baixo percentual na composição dos combustíveis (0 a 5%), sendo a sua presença indesejada pois contribui na formação de substâncias tóxicas corrosivas.

Da mesma forma que o enxofre, o nitrogênio contribui para a formação de óxidos de nitrogênio (elemento altamente poluente), sendo também indesejado na composição do combustível. Por fim, o oxigênio presente no combustível faz com que haja necessidade de menos ar para a combustão. (GARCIA, 2002). Os combustíveis sólidos podem ser encontrados na forma natural (como Carvão Mineral, Resíduos de processos e Biomassa) ou artificial (como Coque de carvão e Carvão Vegetal). Sendo

assim, o resíduo da sucata tipo Fluff, estudado no presente trabalho, se caracteriza como um combustível sólido natural.

3.5 Caracterização dos combustíveis sólidos

O conhecimento da composição e das propriedades de um combustível é importante não só no projeto como na operação de equipamentos que envolvem o processo de combustão.

3.6 Composição dos combustíveis sólidos

A composição do combustível é essencial para avaliar teoricamente a combustão e determinar estequiometricamente as condições mais adequadas para a queima do combustível.

Uma análise dos produtos resultantes após a combustão também é essencial para poder fazer balanços térmicos e identificar a quantidade e tipo de substâncias liberadas para o meio ambiente.

Para isto são utilizadas técnicas padronizadas para análise e estas podem ser de dois tipos:

- Análise elementar
- Análise imediata

Os métodos empregados na análise imediata são relativamente simples e rápidos, motivo pelo qual a análise imediata dos combustíveis sólidos é mais comumente empregada que a análise elementar, cuja realização é sempre mais complexa.

3.6.1 Análise elementar

A análise química elementar de uma amostra de combustível define o conteúdo, percentual em massa ou volume, dos elementos que formam parte da composição química do combustível, ou seja, basicamente carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio e cinzas e umidade como complemento de informações.

Esta composição é determinada experimentalmente e representa uma informação essencial para análise do processo de combustão, que envolve o cálculo

da quantidade de ar necessário para a combustão, quantidade e tipo de gases produzidos e energia liberada no processo de combustão ou Poder Calorífico. Na Tabela 1 abaixo, segue um exemplo de resultados de uma análise elementar:

Tabela 1- Exemplo de resultados de uma análise elementar

Combustível	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas	Oxigênio
Carvão mineral	40 a 60	2,5 a 3,5	1	0,5 a 3,0	51 a 25,5	5 a 7
Carvão vegetal	93,0	1,0	1,4	0,08	1,32	3,2

Fonte: (GARCIA, 2002)

3.6.2 Análise imediata

O conteúdo, percentual em massa, de carbono fixo, voláteis, cinzas e umidade é determinado pelo ensaio de análise imediata. Estes parâmetros estão relacionados diretamente com a utilização do combustível e são importantes para o cálculo do projeto da fornalha e das quantidades necessárias de ar primário e secundário em função da percentagem de voláteis presentes no combustível. Também o teor de voláteis tem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais da combustão de combustíveis sólidos.

- % de Cinzas: engloba todos os constituintes minerais do combustível e é obtido após a oxidação completa da amostra de combustível durante a análise experimental. Estes constituintes compreendem óxidos como: óxido de alumínio (Al_2O_3); óxido férrico (Fe_2O_3); óxido de silício (SiO_2); óxido de potássio (K_2O); óxido de cálcio (CaO); óxido de magnésio (MgO); etc.
- % de Carbono fixo: representa a porção do combustível (excluído as cinzas) que resta após a saída do material volátil e da umidade. Consiste principalmente de carbono elementar, embora possa também conter ainda alguns elementos voláteis como O_2 , H_2 e N_2 não liberados durante a determinação experimental do teor de voláteis e enxofre.

- % de Materiais voláteis: é obtido ao submeter a amostra à uma temperatura de 950°C sendo a parte do combustível que se separa na forma de gases. Ela se compõe de gases combustíveis (como hidrogênio) e de gases não combustíveis (oxigênio e nitrogênio). A quantidade de material volátil presente no combustível, afeta a mecânica de acendimento, o volume da fornalha e o arranjo das superfícies de troca térmica.
- % de Umidade: é determinado na análise experimental pela perda em peso do combustível sólido quando aquecido em estufa a 110°C e representa a quantidade de água retida mecanicamente no combustível. A avaliação deve ser realizada com uma pequena quantidade de combustível finamente dividido.

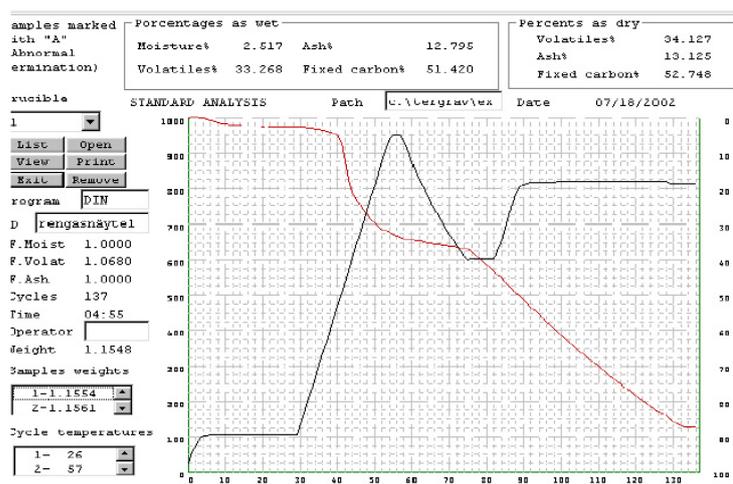
Dessa forma, o conteúdo de água medido corresponde à água que reside no combustível e que varia conforme a umidade relativa do ar (condição de equilíbrio). Assim, a água que entra na composição química do combustível (que faz parte das moléculas dos seus constituintes) não está incluída nesta umidade e nem aquela adquirida pela exposição à chuva.

Esta última pode ser eliminada facilmente por ventilação natural ou pelo aquecimento em estufa a 50°C. O elevado teor de umidade tem uma grande influência no processo de combustão e afeta o Poder calorífico do combustível.

Esse procedimento pode ser feito automaticamente com o uso de um TGA (Analisador Termogravimétrico) como ilustra as Figuras 16 e 17. Instrumentos para termogravimetria são equipados com sistemas de pesagem de alta resolução.

A disposição das amostras de carregamento top-loading permite a operação fácil e medição da temperatura diretamente na amostra. O sinal opcional c-DTA® adicionalmente fornece informações sobre os processos exotérmicos e endotérmicos na amostra, mesmo que eles não estejam relacionados com uma mudança de massa. Adaptadores de acoplamento aquecidos (linhas de transferência) para sistemas de análise de gases, tais como QMS, FT-IR ou GC-MS podem ser adicionados para várias termo balanças. (NETZSCH , 2017)

Figura 16 - Análise imediata feita automaticamente em um TG



Fonte: (LABCONTROL, 2017)

Figura 17 - Imagem de um TGA



Fonte: (LABCONTROL, 2017)

3.6.3 Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor desprendido na sua queima completa, estequiometricamente podendo ser inferior ou superior. No caso do Poder Calorífico Inferior, a quantidade de calor é medida com a água gerada na queima na fase gasosa enquanto no Poder Calorífico Superior, a água gerada na combustão é considerada na fase líquida. Dessa forma, a diferença entre eles é exatamente a entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível como umidade do mesmo.

Para combustíveis sólidos e líquidos o poder calorífico inferior pode ser calculado com uma boa aproximação pela seguinte relação da Equação 3.1 (GARCIA, 2002)

$$PCI = PSC - 2440(9H + w) \quad (3.1)$$

PCI: poder calorífico inferior (kJ/kg combustível em base seca)

PCS: poder calorífico superior (kJ/kg comb)

H: teor de hidrogênio (kg H/kg combustível)

W: teor de umidade (kg de água/kg combustível)

O poder calorífico pode ser obtido experimentalmente utilizando uma bomba calorimétrica com temperatura controlada do banho onde está imersa a bomba em que se faz a queima do combustível. O valor obtido no experimento é o Poder Calorífico Superior, dessa forma, para se obter o Poder Calorífico Inferior, deve se utilizar a equação 3.1. (GARCIA, 2002)

Em processos industriais, é mais usado o poder calorífico inferior uma vez que na maioria deles os gases de combustão são liberados a altas temperaturas onde a água contida neles se encontra na fase gasosa. Para a obtenção do poder calorífico inferior, é necessário conhecer o teor de hidrogênio do combustível. Essa informação pode ser obtida através de uma análise elementar.

3.6.4 Granulometria

Estado de divisão (ou granulometria) de um combustível sólido tem importância no transporte, armazenagem, sistemas de alimentação e queima do combustível. Alguns problemas causados por partículas de granulometria pequena são:

- Entupimento das grelhas,
- Dificuldade na passagem do ar de combustão,
- Arrastamento das partículas sem terem sido completamente queimadas.

As dimensões das partículas são empregadas no cálculo do número de Reynolds, a partir do qual pode-se calcular diversos parâmetros tais como as velocidades terminais, as velocidades de mínima fluidização, os coeficientes de transferência de calor, etc. (LORA e NASCIMENTO, 2004)

Na análise granulométrica, o material sólido normalmente é seco e passado por um conjunto de peneiras, com aberturas decrescentes, como ilustrado na Figura 18. As frações mássicas retidas em cada uma delas são apresentadas de forma individualizada e acumulada, sendo esse procedimento, no Brasil, regulado pela ABNT-NBR 6946/94.

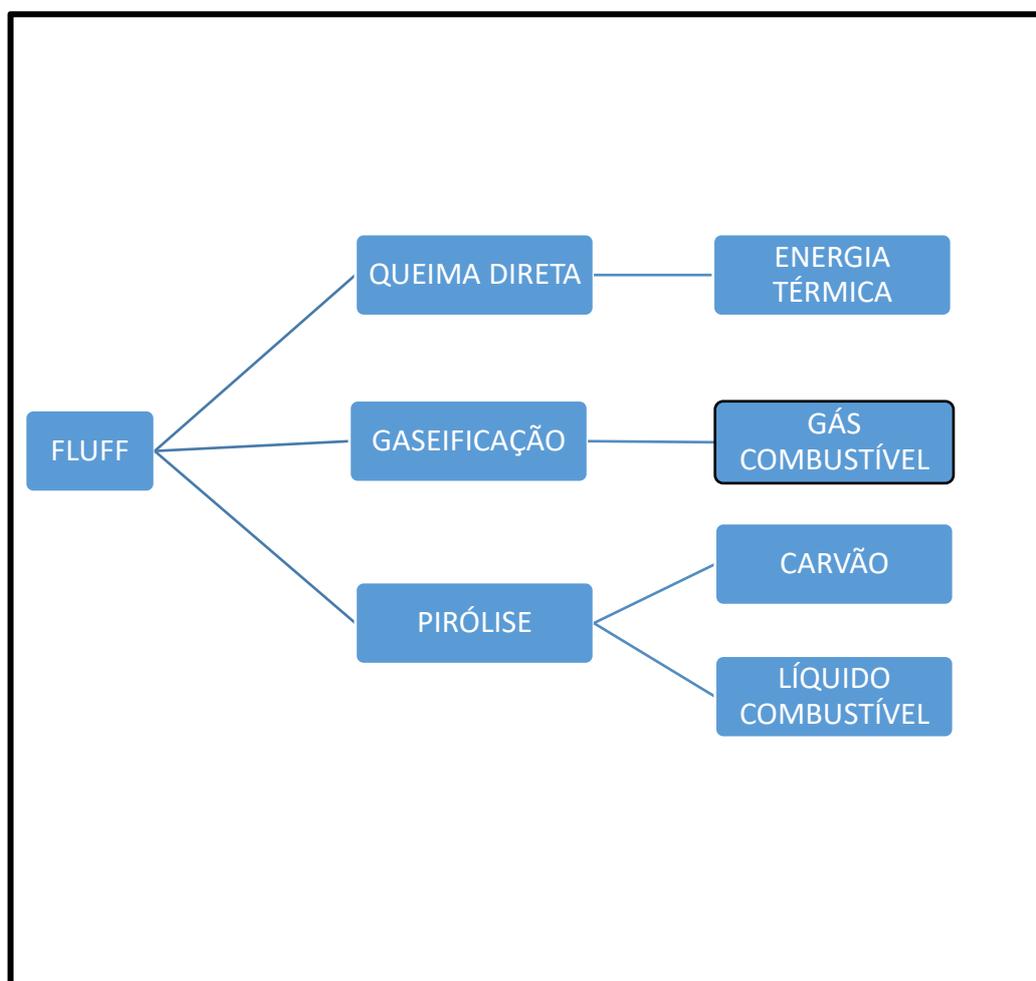
Figura 18 - Conjunto de peneiras para análise granulométrica do material



Fonte: Autor

3.7 Técnicas para conversão do Fluff em energia

Atualmente, existem diversas técnicas possíveis para a conversão do Fluff em energia ou combustível. Algumas delas estão mostradas na Figura 19. No presente trabalho vamos considerar apenas a queima direta.

Figura 19 - Algumas técnicas para conversão do Fluff e seu produtos

Fonte: Autor

3.7.1 Queima direta

A queima direta consiste na obtenção de energia térmica a partir da queima do resíduo. Antes da queima, em geral, a biomassa passa por uma série de etapas de limpeza, retirada de impurezas e desumidificação.

Como exemplos, podemos citar o uso do bagaço de cana (biomassa) em caldeiras para geração de vapor nas usinas de açúcar e álcool. Segundo Gonzales (2014), a queima direta é utilizada por aproximadamente metade da população do planeta e 90% das casas em região rural para a geração de calor.

4 METODOLOGIA

Para atender os objetivos do estudo as atividades experimentais foram divididas em três etapas:

1. Levantar informações sobre a composição física do Fluff gerado no Shredder de uma indústria siderúrgica.
2. Realizar uma avaliação termogravimétrica do Fluff pelo método de análise imediata, utilizado um forno mufla.
3. Realizar estudos experimentais de poder calorífico em amostras de Fluff através de uma bomba calorimétrica.
4. Cálculo das incertezas

4.1 Levantar informações sobre a composição física do Fluff gerado no Shredder de uma indústria siderúrgica

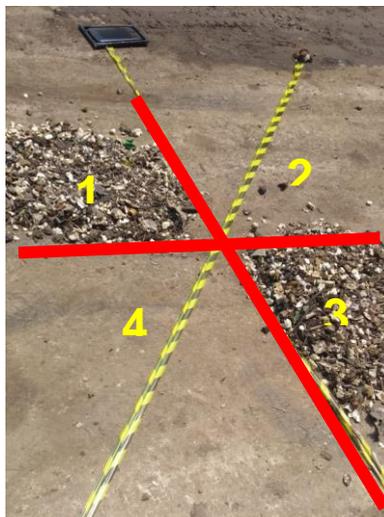
4.1.1 Coleta do material

O material estudado nesse trabalho foi o Fluff miúdo (entre 16 e 50mm) coletado na baía do Transportador de Correias (TC) 13. As amostras serão coletadas uma usina siderúrgica seguindo o procedimento abaixo:

1. A amostra deve ser coletada diretamente da saída da esteira de Fluff durante processamento da sucata com o auxílio de uma pá carregadeira. O operador da pá carregadeira deve posicionar a concha do equipamento durante 2min para coletar uma amostra. Devem ser coletadas 3 amostras com intervalos entre elas entre 30min e 1h de forma a abranger diversos pontos da campanha de processamento.
2. Após a coleta das 3 amostras, é necessário fazer o quarteamento como forma de reduzir o tamanho da amostra. Conforme a ilustração da Figura 20, a pilha de material é dividida em quatro volumes iguais. A partir daí dois

desses quadrantes opostos são descartados (por exemplo, 2 e 4) e os outros dois são homogeneizados. O procedimento se repete até que reste somente a amostra desejada (no caso, 5kg).

Figura 20 - Foto do quarteamento realizado



Fonte: Autor

3. O material então é armazenado em BAGs para aguardar a caracterização.
4. O procedimento de amostragem deve ser repetido em 3 dias de forma a obter-se uma amostra representativa do material.

4.1.2 Separação por granulometria e tipo de material

Como dito anteriormente, o Fluff é um material bastante heterogêneo sendo composto por materiais como plásticos, borrachas, madeira e até mesmo metais dessa forma, faz-se necessária a caracterização do Fluff pelos diferentes materiais que o compõem.

Essa caracterização é feita após um peneiramento que separa o material nas seguintes granulometrias:

- $X > 50$ mm
- $31,5 < X < 50$ mm
- $16 < X < 31,5$ mm
- $< X < 16$ mm
- $X < 4$ mm

Para essa separação granulométrica, foi utilizada uma peneira vibratória com 4 granulometrias de peneira como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Peneira vibratória utilizada na separação gravimétrica do Fluff



Fonte: Autor

Após o peneiramento, dá-se início a triagem manual. O ambiente em que a separação será executada deve ser favorável para o serviço, devendo haver uma mesa, imãs e iluminação adequada como visto na Figura 22.

Figura 22 - Ambiente adequado para a separação manual do Fluff



Fonte: Autor

Para os procedimentos descritos são necessárias as seguintes ferramentas e equipamentos:

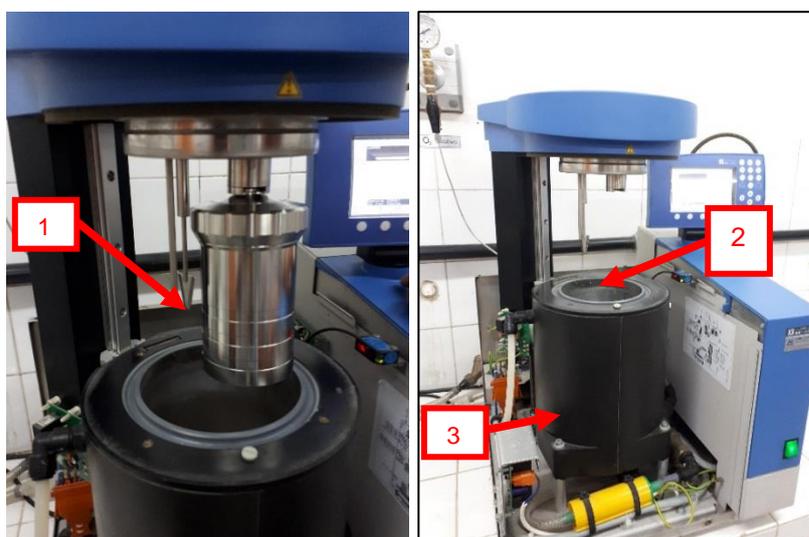
- Baldes de amostra;
- Luvas;
- Peneira vibratória de caracterização;
- Telas de 4mm; 16mm; 31,5mm e 50mm;
- Balança de mesa;
- Mesa não-magnética;

4.2 Realizar estudos experimentais de poder calorífico em amostras de Fluff através de uma bomba calorimétrica

O poder calorífico superior para combustíveis sólidos ou líquidos é encontrado com o uso de uma bomba calorimétrica. Esse equipamento, representado na Figura 23 é constituída basicamente de três partes:

1. Um vaso de decomposição, contendo o oxigênio e o combustível e onde a reação é realizada.
2. Um recipiente contendo uma quantidade bem definida de água e onde são imersos a bomba, o termômetro e um dispositivo agitador.
3. Uma camisa isolante que evita a perda de energia para o meio ambiente.

Figura 23 - Partes de uma Bomba Calorimétrica



Fonte: Autor

No vaso de decomposição existe um cadinho onde é colocada uma amostra do combustível (em torno de 1 g). A bomba é hermeticamente fechada e pressurizada com oxigênio (aproximadamente 30 bar) de forma a garantir oxigênio suficiente para a queima completa do combustível.

O calor liberado na reação de combustão é transferido para a água contida no calorímetro e a elevação de temperatura desta registrado por um termômetro em contato com a água. Enquanto isso, a função do agitador é homogeneizar a temperatura da água. Por fim, a energia térmica transferida à água(Q) é associada ao poder calorífico superior (PCS) da amostra, como indicado na Equação 4.1 (GARCIA, 2002).

$$Q = \text{PCS} = m c_p (T_f - T_i)_{\text{água}} \quad (4.1)$$

Onde m é a massa de água, c_p é o calor específico da água (1 cal/g.°C) e T_f e T_i são as temperaturas final e inicial da água respectivamente.

Para a realização dos ensaios térmicos, a amostra foi triturada utilizando um liquidificador comum conforme mostrado na Figura 24. Segundo Park et al. (2016), a trituração é muito importante para a confiabilidade das análises uma vez que o Fluff é composto por diversos materiais combustíveis como papel, madeira e plástico.

Figura 24 - Preparação da amostra de Fluff

a) Fluff antes da trituração

b) Fluff depois da trituração



Fonte: Autor

O poder calorífico de uma amostra de combustível pode ser determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica de acordo com as normas ASTM D1193, ASTM E 1, ASTM D 3177, ASTM E 180, ASTM E 775, ASTM E 790 e ASTM E 829 cujo procedimento consiste em:

1. Pesar a amostra: Misturar as amostras de combustível sólido no mesmo recipiente e posicionar aproximadamente 1g no centro do cadinho onde a amostra será queimada (Figura 25) ;

Figura 25 - Pesagem da amostra a ser queimada



Fonte: Autor

2. Fio de ignição: Conectar o fio aos terminais de ignição com dimensão suficiente para permitir que o fio mantenha contato com a amostra, conforme mostrado na Figura 26 (no presente trabalho foi utilizado algodão como fio de ignição);

Figura 26 - Fio de ignição sendo posicionado nos terminais da bomba calorimétrica



Fonte: Autor

4. oxigênio: Carregar a bomba de oxigênio com pressão entre 20 e 30 atm.
5. Água do calorímetro: Ajustar a temperatura da água entre 1 e 2°C

4.3 Realizar uma avaliação termogravimétrica do Fluff pelo método de análise imediata, utilizado um forno mufla

A análise imediata é realizada através de um procedimento de aquecimento padrão, controlado e seguindo uma sequência que simula o que acontece na prática com a combustão de um sólido. Utilizando cadinho, forno mufla e uma balança de precisão para pesar a amostra durante a queima, a análise imediata fornece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de combustível sólido.

São utilizadas as normas ASTM para análise imediata de carvão e coque (D-3172[72] até D-3175[75]) ou as normas ASTM D 1102 e ASTM E 870 a E 872.

A análise de umidade é feita antes que qualquer outra análise, e é determinada pelo método do forno de secagem (ASTM D-3173[73])

4.3.1 Procedimentos de uma análise imediata

- 1). Coloca-se os cadinhos e as tampas por 1 hora na estufa a 110°C, conforme Figura 27. O objetivo dessa etapa é eliminar a umidade dos cadinhos;

Figura 27- Cadinhos e tampas colocados na estufa para eliminação da umidade



Fonte: Autor

- 2). Coloca-se os cadinhos e as tampas no dessecador por 30 minutos para que resfriem sem absorver umidade, como ilustrado na Figura 28;

Figura 28 - Cadinhos tampados no dessecador por 30 minutos



Fonte: Autor

- 3). Pesa-se os cadinhos com as tampas. Anotar massa dos cadinhos vazios com tampa;
- 4). Coloca-se 1g de amostra nos cadinhos, tampa-se e pesa-se. Anotar massa do cadinho com tampa e amostra;

Cálculo do % de umidade:

- 5). Coloca-se os cadinhos destampados e as tampas na estufa por 2 horas a $110\pm 1^{\circ}\text{C}$; O objetivo dessa etapa é a eliminação da umidade da amostra;
- 6). Coloca-se os cadinhos tampados no dessecador por 30 minutos para que resfriem sem absorver umidade antes da pesagem;
- 7). Pesa-se à uma precisão de 0,02g. Deve-se repetir o procedimento 5 por 30 minutos e pesa-se novamente. Se não houver variação no peso (nesse trabalho foi assumido variações de massa menores que 0,1% como desprezíveis) passa-se a etapa seguinte, caso contrário, repete-se. Anotar massa dos cadinhos tampados com amostra e sem umidade;
- 8). Guardar as amostras tampadas no dessecador para resfriamento;

Cálculo do % de voláteis:

- 9). Aquecer a mufla a $950\pm 20^{\circ}\text{C}$. Nestas condições serão eliminados os gases presentes na amostra (O_2 ; N_2 ; H_2);
- 10). Colocar os cadinhos cobertos junto com as amostras na mufla por 6-7 minutos para a saída dos voláteis, Figura 29;

Figura 29 - Cadinhos com amostra sendo retirados do forno mufla após a saída dos voláteis



Fonte: Autor

- 11). Colocar os cadinhos no dessecador e tampar para que resfriem sem absorver umidade e deixar por 1 hora;
- 12) Após o resfriamento no dessecador, inicia-se um novo processo de pesagem para determinar a massa perdida que será relacionada a saída dos voláteis (massa de voláteis);
- 13). Guardar amostras no dessecador para que não absorvam umidade;

Cálculo do % de cinzas e carbono fixo:

- 14). Com a mufla fria (temperatura < 300°C) colocar os cadinhos destampados, aquecer lentamente até 750°C e manter nesta temperatura durante 2 horas facilitando assim que o carbono da amostra seja oxidado, sobrando no final do processo apenas as cinzas;
- 15). Colocar os cadinhos com as cinzas no dessecador e tampar para que resfriem. Deixar durante 1 hora ou mais;
- 16) Com a amostra seca (sem umidade), sem voláteis e agora sem carbono fixo, são pesadas as amostras determinando a massa de cinzas.
- 17) Fazer as contas conforme Equação 4.2.

$$\text{Massa de carbono} = \text{massa inicial} - \Sigma \text{ massa [umidade, voláteis, cinzas]} \quad (4.2)$$

4.3.2 Apresentação dos dados

A apresentação dos dados de composição elementar e imediata podem ser oferecidos em base seca, base úmida e base combustível. As duas primeiras são as bases mais usuais.

Base seca: representa a composição do combustível (em massa ou volume) desconsiderando o teor de umidade presente no combustível:

- Análise elementar: %C + %H + %O + %N + % S + %cinzas = 100%
- Análise imediata: %carbono fixo + %cinzas + %voláteis = 100%

Base úmida: representa a composição do combustível (em massa ou volume) incluindo o teor de umidade presente no combustível:

- Análise elementar: %C + %H + %O + %N + % S + %cinzas + %umidade = 100%
- Análise imediata: %carbono fixo + %cinzas + %voláteis + %umidade = 100%

Base combustível: representa a composição considerando apenas os elementos orgânicos do combustível e sem considerar o teor de umidade:

- Análise elementar: %C + %H + %O + %N + % S = 100%
- Análise imediata: %carbono fixo + %voláteis = 100%

Essas bases devem ser escolhidas de acordo com a necessidade do cliente do combustível. No caso desse trabalho, será utilizada a base seca e a base úmida.

4.4 Calcular as incertezas

Para o cálculo das incertezas relacionadas à análise imediata foram utilizadas as equações 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 para cada um dos 4 ensaios de cada amostra. Onde u é a massa de umidade presente na amostra, m_{c+a} é a massa do cadinho tampado com a amostra, m_c é a massa do cadinho vazio com tampa, m_s é a massa do cadinho com amostra sem umidade e m_i é a massa inicial da amostra.

$$m_i = (m_{c+a} - m_c) \pm \sigma_i \quad (4.3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{c+a}^2 + \sigma_c^2} \quad (4.4)$$

$$u = (m_i - m_s) \pm \sigma_u \quad (4.5)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_i^2} \quad (4.6)$$

As incertezas σ_{c+a} , σ_c e σ_s são referentes à medição na balança da massa do cadinho tampado com a amostra, à massa do cadinho vazio com tampa e à massa do

cadinho com amostra sem umidade respectivamente. Essas incertezas têm valores iguais à resolução da balança: 0,0001g. Enquanto isso, as incertezas σ_u e σ_i são calculadas utilizando os princípios de propagação de incertezas.

Para o cálculo da incerteza referente ao teor de umidade ($u\%$) foram utilizadas as equações 4.7, 4.8 e 4.9 e para o cálculo da média entre os 4 ensaios de uma mesma amostra foram utilizadas as equações 4.10 e 4.11. Onde $\sigma_{u\%}$ é a incerteza relacionada ao cálculo do percentual de umidade, $\bar{u}_{\%}$ é a média entre os percentuais de umidade de cada ensaio na mesma amostra e $\sigma_{\bar{u}_{\%}}$ é a incerteza relacionada à essa média.

$$u_{\%} = \frac{u}{m_i} \pm \sigma_{u\%} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{u\%} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_{\%}}{\partial u} \times \sigma_u\right)^2 + \left(\frac{\partial u_{\%}}{\partial m_i} \times \sigma_{m_i}\right)^2} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{u\%} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_i} \times \sigma_u\right)^2 + \left(\frac{u}{m_i^2} \times \sigma_{m_i}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$\bar{u}_{\%} = \frac{u_{\%1} + u_{\%2} + u_{\%3} + u_{\%4}}{4} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{\bar{u}_{\%}} = \frac{1}{4} \times \sqrt{\sigma_{u_{\%1}}^2 + \sigma_{u_{\%2}}^2 + \sigma_{u_{\%3}}^2 + \sigma_{u_{\%4}}^2} \quad (4.11)$$

Por fim, para o cálculo do percentual de umidade médio entre as 3 amostras, foi feita uma média aritmética entre os percentuais de umidade de cada uma e a incerteza total foi calculada utilizando a equação 4.12, onde $\bar{\sigma}_{u_{\%}}$ é a incerteza relativa ao teor de umidade médio das 3 amostras e $\bar{\sigma}_{u_{\%1}}$, $\bar{\sigma}_{u_{\%2}}$ e $\bar{\sigma}_{u_{\%3}}$ são as incertezas médias de cada uma das 3 amostras calculadas a partir da equação 4.11

$$\bar{\sigma}_{u_{\%}} = \frac{1}{3} \times \sqrt{\bar{\sigma}_{u_{\%1}}^2 + \bar{\sigma}_{u_{\%2}}^2 + \bar{\sigma}_{u_{\%3}}^2} \quad (4.12)$$

Um procedimento análogo é feito para o cálculo das incertezas nos percentuais de voláteis, cinzas e carbono fixo.

Para o cálculo das incertezas relacionadas à análise do poder calorífico foram utilizadas as equações 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, onde Q é a energia referente ao PCS em Joules, m é a massa do combustível a ser queimada em gramas, σ_m é a incerteza relacionada a medição da massa através da balança ($\pm 0,0001g$). O σ_{bal} é a incerteza do PCS gerada pela balança na pesagem da massa e é calculada como a diferença entre o maior valor de PSC ($PSC_{m\acute{a}x}$), calculado considerando a massa igual a $m - \sigma_m$ e o menor valor (PSC_{min}), calculado considerando a massa igual a $m \pm \sigma_m$.

$$Q = PCS \times m \quad (4.13)$$

$$PSC_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{m - \sigma_m} \quad (4.14)$$

$$PSC_{min} = \frac{Q}{m + \sigma_m} \quad (4.15)$$

$$\sigma_{bal} = \frac{PSC_{m\acute{a}x} - PSC_{min}}{2} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{PCS} = \sqrt{\sigma_{cal}^2 + \sigma_{bal}^2} \quad (4.17)$$

Por fim, a incerteza do PCS para cada amostra é igual a combinação da incerteza σ_{bal} e a incerteza referente ao calorímetro σ_{cal} que é igual à ± 1 J/g, equação 4.17. E com isso, a média entre as incertezas dos PCS das 3 amostras ensaiadas é calculada da mesma forma mostrada na equação 4.12.

5 RESULTADOS

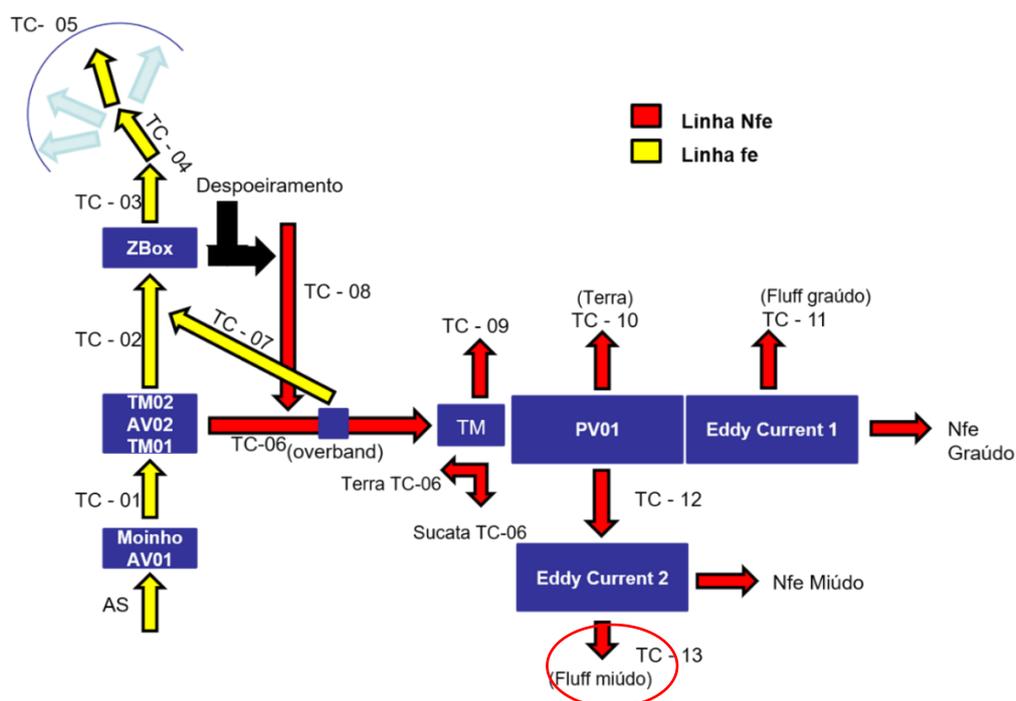
5.1 Balanço de massa

Inicialmente foi realizado uma quantificação dos resíduos gerados no Shredder. A geração desses resíduos do processo de trituração da sucata no equipamento Shredder é dividido em seis frações distintas:

1. Terra retirada da sucata na baía do TC06;
- Separados pelo primeiro Eddy Current com granulometria acima de 50mm:
2. Fluff graúdo na baía do TC11 e
3. Metais não ferrosos graúdos na baía do Eddy Current 1;
- Separados pelo primeiro Eddy Current com granulometria entre 16mm e 50mm:
4. Fluff miúdo na baía do TC13 e
5. Metais não ferrosos graúdos na baía do Eddy Current 2;
6. Por fim, o material com granulometria abaixo de 16mm(finos) é separado pela peneira vibratória como Finos (terra) e direcionado para a baía do TC10

A Figura 30 ilustra o fluxo do processo com destaque para o Fluff miúdo da TC13: material estudado nesse trabalho.

Figura 30 - Linha de não ferrosos da planta Shredder – destaque para o Fluff miúdo da TC13



Fonte: Autor

A quantificação da massa de entrada de sucata e dos fluxos de materiais nas diferentes baias do equipamento Shredder, na corrida analisada, é apresentada Tabela 2, com destaque para o resíduo estudado no trabalho, o Fluff miúdo. Os resultados obtidos foram semelhantes aos apresentados por Reckziegel (2012), Tabela 3, a medida que 21,1% da sucata processada se torna resíduos enquanto Reckziegel (2012), encontrou uma porção de 24,4% em uma planta Shredder do Rio Grande do Sul.

Nota-se também uma recuperação de metais não ferrosos observada nesse trabalho (10,7 kg/ton de sucata processada) é muito superior aos obtidos por Reckziegel (2012), 5 kg/ton, isso se deve à divisão do fluxo de resíduos por granulometria entre dois equipamentos Eddy Current. Essa configuração aumenta consideravelmente a eficiência da separação, como descrito na fundamentação teórica deste trabalho. A recuperação de metais não ferrosos traz grandes ganhos para a empresa, pois esses materiais não só deixam de ser destinados à aterro, como podem ser vendidos para a reciclagem gerando receita para a empresa.

Tabela 2 - Balanço de massa da planta Shredder durante mês do estudo

entradas e saídas	% da produção
Saída-Sucata triturada	78,9%
Saída -Resíduos	21,1%
Entrada de sucata	100,0%

Material	kg/(ton de sucata)	% dos resíduos
Fluff TC-13 (miúdo)	33,3	15,8%
Fluff TC-11 (graúdo)	39,85	18,9%
Terra TC-10 (finos)	92,52	43,9%
Terra TC-06	34,37	16,3%
Não ferrosos Graúdo	4,8	2,3%
Não ferroso Médio	5,9	2,8%
TOTAL - Resíduos	210,74	100,0%

Fonte: Autor

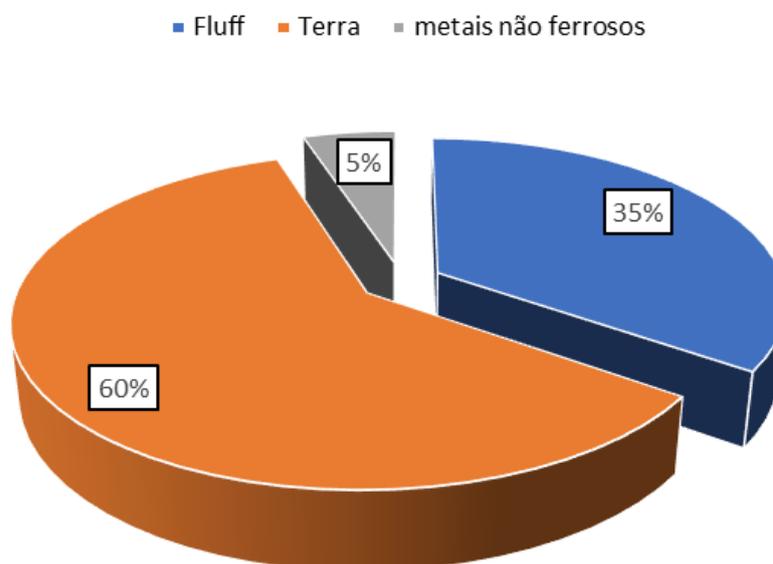
Tabela 3 - Balanço de massa referente a um dia, feito em uma planta Shredder no Rio Grande do Sul

entradas e saídas	% da produção
Saída-Sucata triturada	75,6%
Saída -Resíduos	24,4%
Entrada de sucata	100,0%

Material	kg/(ton de sucata)	% dos resíduos
Fluff(<15mm)	23,9	9,8%
Fluff (entre 15 e 100mm)	212,4	87,1%
Fluff (>100mm)	2,5	1,0%
Não ferroso	5,1	2,1%
TOTAL - Resíduos	243,9	100,0%

Fonte: Adaptado de Reckziegel (2012)

Na Figura 31, pode-se observar que a maior quantidade de material, 60% é composta por finos (terra) a qual atualmente é destinada à indústria cimenteira, sendo utilizada na fabricação do clínquer. O Fluff, fração dos resíduos não metálicos acima de 16mm, corresponde à 35% do total dos resíduos. Muito embora não seja a maior porção do material, dentre os três resíduos do Shredder, o Fluff é o único que ainda não possui aplicação prática em processos internos ou externos, justificando assim o desenvolvimento de um destino alternativo ao aterro para esse resíduo.

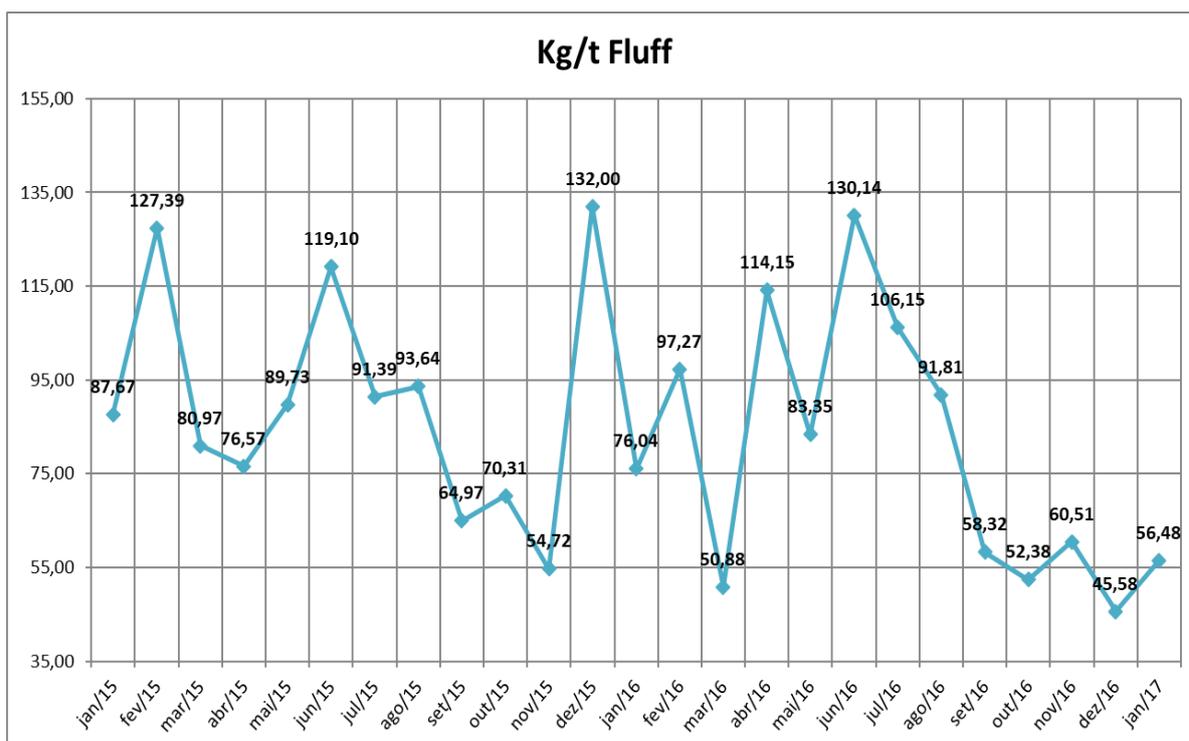
Figura 31 - Proporção dos resíduos gerados em um mês de produção da planta Shredder

Fonte: Autor

No balanço de massa atual (2018), verificou-se que foram gerados 210,74 kg de resíduos por tonelada de sucata processada no Shredder. Destes, 10,7 kg é de sucata metálica não ferrosa, que encontra fácil destinação; 130,9 kg é de terra (finos) que é destinada às cimenteiras e 73,15kg é de Fluff, sendo 33,3 do Fluff miúdo. Esse valor está de acordo com a literatura, Reckziegel (2012), indica uma geração de 244kg de resíduo de Shredder por tonelada de sucata processada.

Segundo dados coletados na mesma planta siderúrgica estudada no presente trabalho entre janeiro de 2015 e janeiro 2017, a produção média de resíduo é de 154kg por tonelada de sucata processada, sendo 84kg/ton de Fluff e 65kg/ton de terra e 5kg de metal não ferroso. Essa variação na quantidade de resíduos gerados na trituração da sucata, se deve aos diferentes tipos de sucata empregadas no Shredder, assim como diferentes métodos de separação e processamento.

Figura 32 - Fluff gerado(kg) por tonelada de sucata processada no Shredder mês a mês. Dados coletados na planta Shredder estudada no presente trabalho entre janeiro 2015 e janeiro 2017



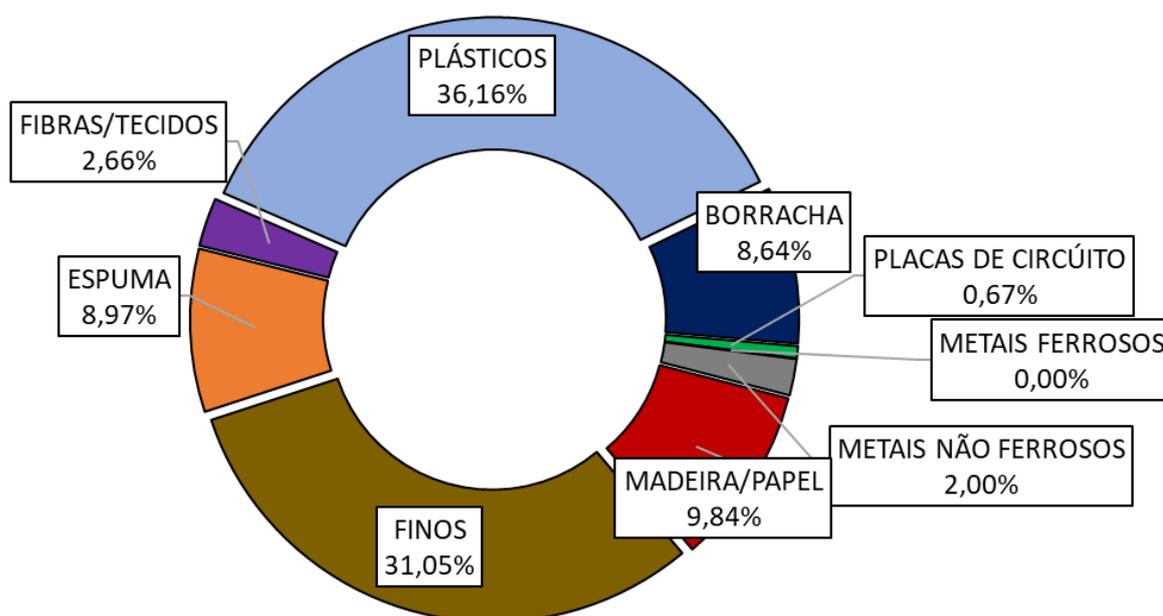
Fonte: Autor

5.2 Resultados da Caracterização Gravimétrica

Inicialmente foram coletadas 3 amostras de Fluff miúdo (em 3 dias diferentes) conforme procedimento descrito na metodologia. Em seguida o resíduo foi caracterizado gravimetricamente, obtendo os resultados mostrados nas Figura 33 a 35.

Como pode ser visto na Figura 33, grande parte do resíduo é constituído por plásticos (36,16%) e por finos (31,05%). Muito embora a parcela de finos seja constituída por vários materiais, tais como terra, metais não ferrosos, plásticos e vidro, eles não puderam ser caracterizados detalhadamente por separação manual por conta do seu tamanho reduzido. Dessa forma, todos os materiais constituintes do Fluff com granulometria menor que 4mm foram caracterizados como finos.

Figura 33 - Composição material da amostra Fluff miúdo (entre 4 e 50mm) - %wt



Fonte: Autor

As Figuras 34 e 35 mostram a distribuição granulométrica do Fluff e a composição para cada granulometria, respectivamente. A fração entre 16 e 31,5 mm constitui mais da metade da amostra (60,17%) e é constituída principalmente por plásticos (51,7%). Fenômeno semelhante foi observado em Morselli et al. (2010) onde na fração entre 20 e 50mm foi encontrado um alto teor de polímeros (37%). O teor de

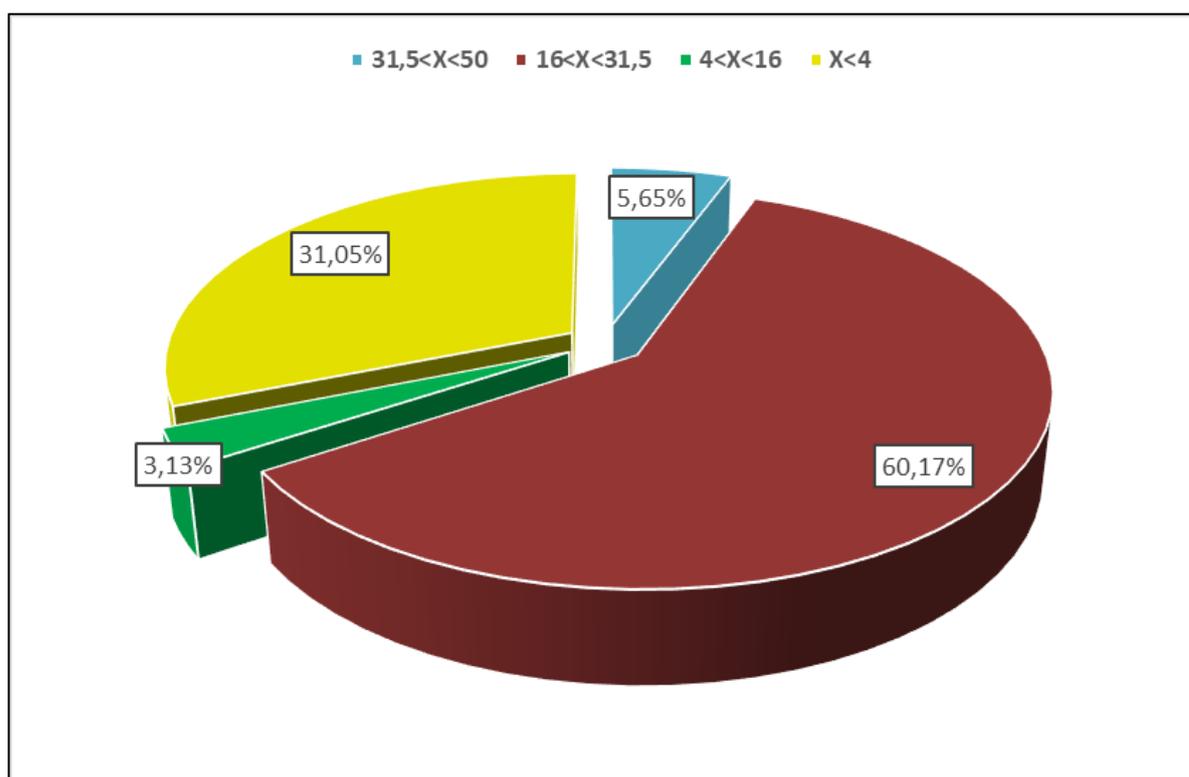
polímeros, em especial o PVC pode ser preocupante pois, eles resultam em um maior conteúdo de cloretos e se utilizado como combustível pode dar origem a substâncias tóxicas na combustão.

A menor fração em massa do resíduo é entre 4 e 16mm. Isso se deve ao fato de que a composição dessa fração de material é 100% espuma, que é um material de densidade muito leve.

A fração de finos (>4mm) no Fluff é considerável (31,05%). A presença de finos no combustível é indesejada, pois, segundo Morselli et al. (2010) ela possui poder calorífico superior relativamente baixo, 11700 KJ/kg e uma grande quantidade de cinzas e metais.

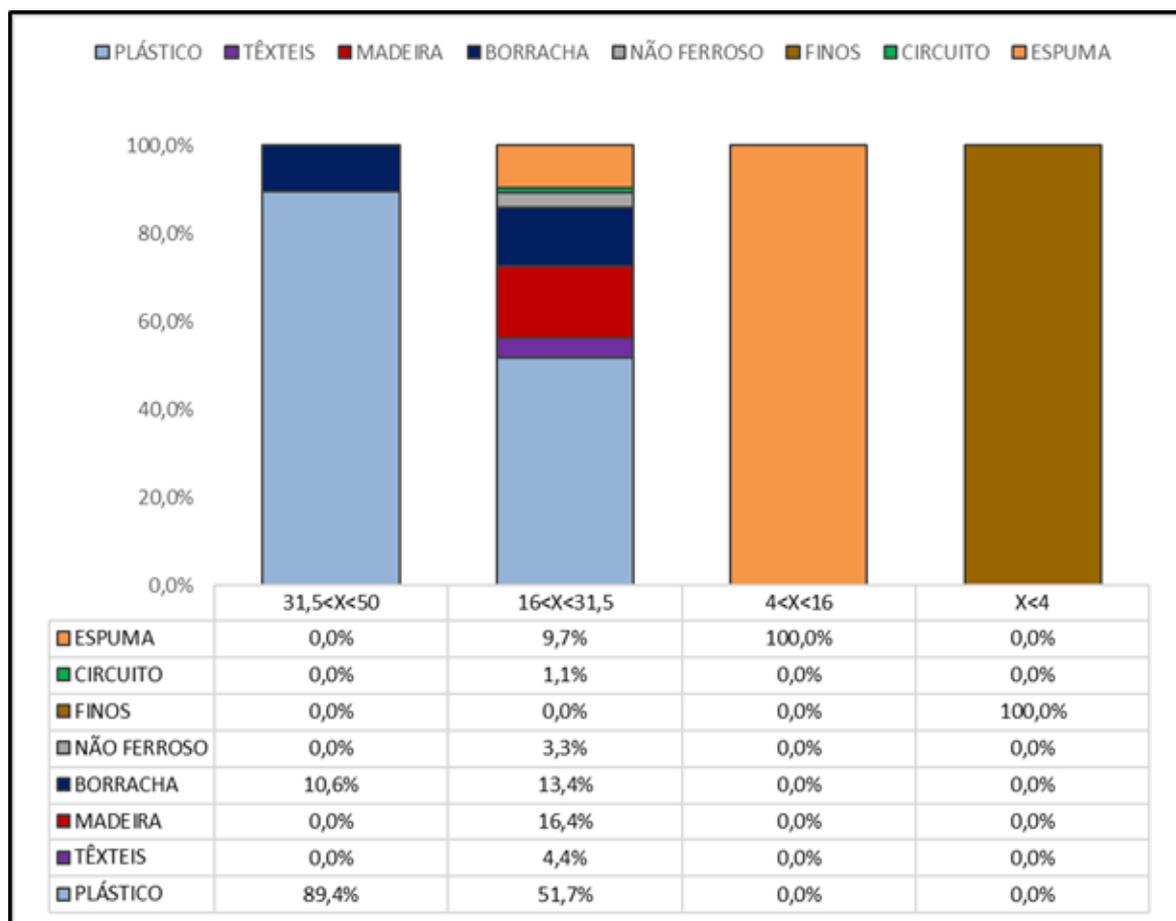
De acordo com Reckziegel (2012), a fração fina do resíduo de Shredder é também rica em óxidos como Ferro e Silício, assim como teor de cloro de 0,09% (abaixo do limite estabelecido de 0,4%). Dessa forma, apesar da fração de finos não ser adequada para utilização como combustível, ela possui potencial de aplicação na indústria de cimento para a confecção do clínquer.

Figura 34 - Distribuição de granulometria da amostra de Fluff miúdo analisada



Fonte: Autor

Figura 35 - Composição material da amostra de Fluff por granulometria - wt%

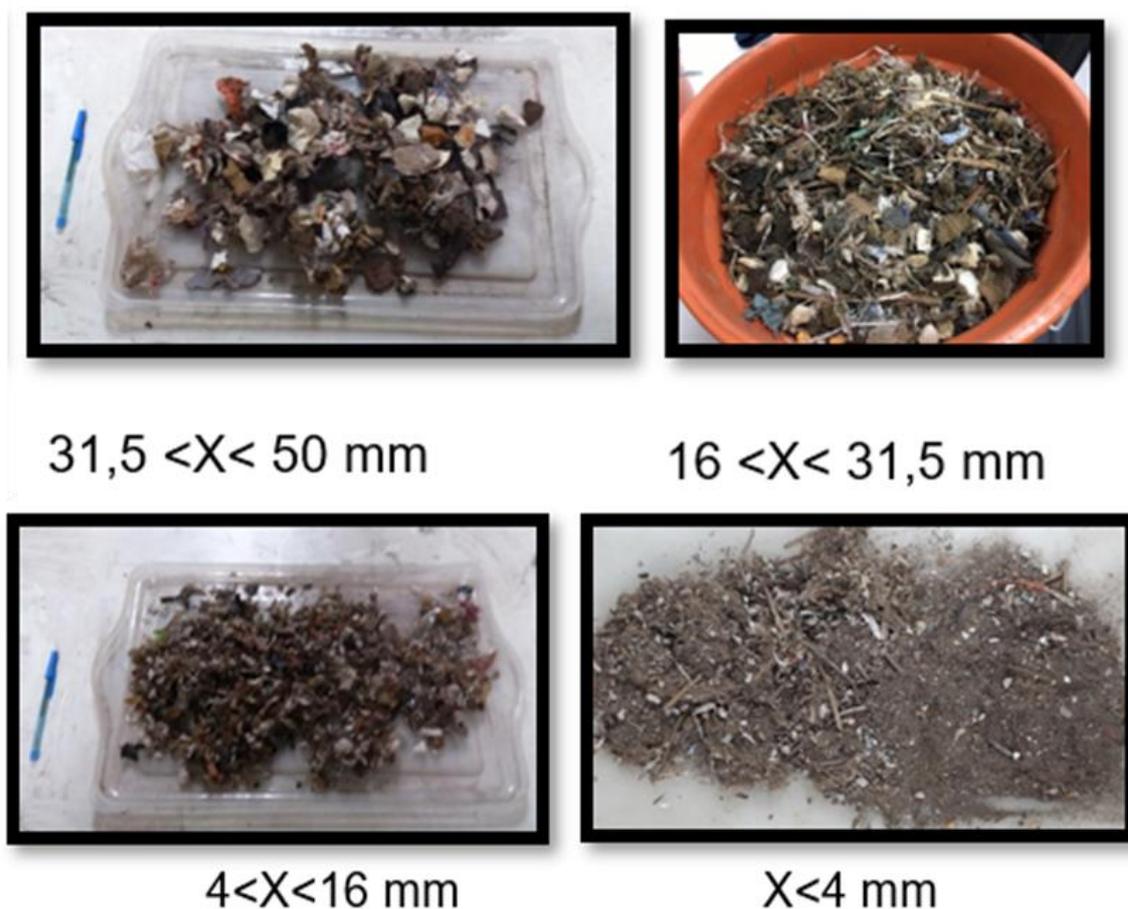


Fonte: Autor

Comparando os resultados obtidos nesse trabalho com os dados levantados na mesma planta em 2017, mostrados na Tabela 7, pode-se observar uma redução do percentual de metais no Fluff, saindo de 3,13% para 2% e uma redução no % de materiais elétricos (placas de circuito). Essa redução se deve à dois fatores. Primeiro, em 2018 foi instalado um segundo Eddy Current, dividendo os fluxos de resíduo e aumentando consideravelmente a recuperação de metais não ferrosos. O outro fator é a instalação de uma polia magnética na esteira do Fluff miúdo, retirando metais ferrosos remanescentes após o processamento do resíduo de Shredder.

A Figura 36 mostra as frações de granulometria da amostra de Fluff analisada. A separação granulométrica foi feita manualmente utilizando uma peneira vibratória conforme procedimento descrito na metodologia deste trabalho.

Figura 36 - Peneiramento do Fluff em diversas faixas granulométricas.



Fonte: Autor

5.3 Resultados da Análise Imediata

Foram realizadas as análises imediatas para cada amostra conforme o procedimento descrito na metodologia. Os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela 4 em base úmida.

Tabela 4 - Resultados das análises imediatas em cada amostra do Fluff (base úmida)

AMOSTRA:	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3
ENSAIO	1	2	3	11	5	6	7	12	8	9	10	13
Massa inicial [g]	4,39	3,78	3,39	4,42	2,14	1,34	1,44	1,87	1,42	1,17	1,49	1,40
Massa de água [g]	0,11	0,08	0,11	0,14	0,12	0,05	0,06	0,09	0,06	0,05	0,05	0,05
Conteúdo de água [%]	2,50%	2,23%	3,32%	3,17%	5,80%	3,52%	4,12%	4,98%	4,14%	4,32%	3,47%	3,29%
Massa de voláteis [g]	2,81	2,54	2,30	3,17	1,47	0,88	1,00	1,21	1,06	0,71	0,94	0,87
Conteúdo de voláteis [%]	63,90%	67,15%	67,95%	71,80%	68,96%	65,19%	69,45%	64,49%	74,76%	60,86%	62,94%	61,98%
Massa de Carbono fixo [g]	1,01	0,81	0,65	0,94	0,31	0,28	0,21	0,32	0,17	0,12	0,29	0,25
Conteúdo de Carbono fixo [%]	22,98%	21,39%	19,27%	21,20%	14,63%	20,96%	14,64%	16,90%	12,20%	10,40%	19,20%	18,20%
Massa de cinzas [g]	0,47	0,35	0,32	0,17	0,23	0,14	0,17	0,26	0,13	0,28	0,21	0,23
Conteúdo de cinzas [%]	10,62%	9,23%	9,46%	3,84%	10,61%	10,33%	11,78%	13,63%	8,90%	24,41%	14,39%	16,53%

Fonte: Autor

Em geral, na análise imediata, altos percentuais de voláteis e carbono fixo e baixos teores de umidade e cinzas são características de bons combustíveis. No caso do Fluff analisado no presente trabalho, o conteúdo de voláteis foi de 66,62% e de cinzas, 11,98%, valores similares aos encontrados por Park et al. (2016) 64,5% e 6.87% respectivamente.

Em contrapartida, a umidade encontrada foi de 3,74% contrastando com os 25,36% encontrados por Park et al. (2016), mostrando um potencial energético superior no resíduo analisado no presente estudo. Os resultados da análise imediata estão apresentados na base seca e base úmida na Tabela 5.

Tabela 5 - Apresentação dos resultados da análise imediata do Fluff em base seca e base úmida

CARACTERÍSTICA	BASE ÚMIDA	BASE SECA
UMIDADE (%)	3,740% \pm 0,004%	-
VOLÁTEIS (%)	66,620% \pm 0,003%	69,208% \pm 0,003%
CARBONO FIXO (%)	17,663% \pm 0,006%	18,350% \pm 0,006%
CINZAS (%)	11,977% \pm 0,003%	12,443% \pm 0,003%

Fonte: Autor

5.4 Resultados da análise do Poder Calorífico Superior (PCS)

Foram feitos três experimento de poder calorífico superior para cada uma das 3 amostras conforme o procedimento descrito na metodologia. Em média, o valor de Poder Calorífico Superior (PCS) encontrado em base úmida foi de 22.829 kJ/kg de combustível e 23744 kJ/kg na base seca. Os resultados obtidos nas análises de cada amostra estão ilustrados na Tabela 6 em base úmida e base seca. O valor para o PCS na base seca foi obtido multiplicando o valor encontrado na bomba calorimétrica para cada amostra pela massa que foi queimada e dividindo esse valor pela massa queimada subtraída da umidade obtida na análise imediata, conforme a Equação 5.1

Tabela 6 - Valores para o Poder Calorífico Superior Encontrados no presente trabalho.

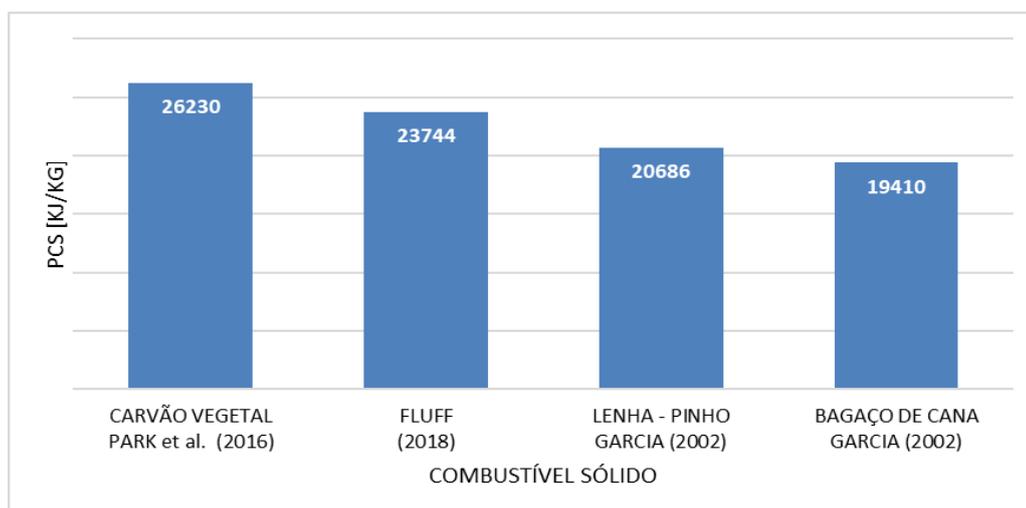
AMOSTRA	PCS (kJ/kg) - BASE ÚMIDA	PCS (kJ/kg) - BASE SECA
1	20187 ± 5	20768 ± 5
2	24513 ± 8	25741 ± 8
3	23788 ± 6	24723 ± 6
MÉDIA	22829 ± 4	23744 ± 4

Fonte: Autor

$$PCS_{bs} = \frac{PSC_{bu} \cdot m}{m - (m \cdot \%umidade)} \quad (5.1)$$

Onde m é a massa queimada, o %umidade é o percentual em massa da umidade obtido na análise imediata, PCS_{bs} é o valor do PCS na base seca e PSC_{bu} na base úmida em kJ/kg.

O valor médio encontrado para o PCS foi semelhante ao obtido em 2017 na mesma planta: 25828 KJ/kg e está próximo aos valores obtidos na literatura como no trabalho desenvolvido por Khoder et al. (2017) no reino unido onde foi obtido um valor de PCS de 24.200 kJ/kg. Dessa forma, o Fluff se mostra como um interessante combustível sólido com poder calorífico em base seca superior ao bagaço de cana em mais de 20% como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Comparação do Poder Calorífico Superior do Fluff em base seca com o de outros combustíveis sólidos

Fonte: Autor

5.5 Comparação dos resultados obtidos com dados da literatura

O Fluff é um material bastante heterogêneo, sendo composto principalmente por plásticos, borracha, madeira, têxteis e finos. A presença de cada um desses materiais varia consideravelmente de acordo com o tipo de sucata processada do Shredder; tecnologias de separação; métodos de classificação e retirada de impurezas da sucata e até mesmo pela região de onde a sucata se origina. Dessa forma, é interessante a resultados obtidos com os resultados alcançados em outros trabalhos, em outras plantas de diferentes países como ilustrado na Tabela 7.

O Fluff caracterizado neste trabalho (destacado na Tabela 8 em amarelo) assemelha-se em composição com a fração de 20 a 50mm do resíduo caracterizado por Morselli et al. (2010) no teor de plásticos (36,16% no presente trabalho e 37% no trabalho citado). Em concordância com os dados mostrados na Figura 35, percebe-se aí uma influência na granulometria e a composição do resíduo.

Nos obtidos por Mancini, Tamma e Viotti (2010) é perceptível que o tipo de sucata alimentada influencia na composição do resíduo. No presente trabalho, percebe-se uma relação da granulometria com a composição do Fluff. Enquanto o teor de finos é inversamente proporcional à granulometria, a quantidade de plásticos e borracha tende a ser maior para maiores granulometrias de Fluff.

Percebe-se uma diferença entre as amostras de Fluff caracterizadas nesse trabalho e um levantamento feito em 2017 da mesma planta. O teor de finos em 2017 foi bem inferior (15,34%) e o percentual de metais na análise de 2017 foi de 0,7% de metais ferrosos e 2,43% de metais não ferrosos, contra 0% e 2% respectivamente encontrado no trabalho atual. Essa diferença na composição se deve a dois fatores: primeiro, o Fluff caracterizado em 2017 foi com todos os materiais de granulometria acima de 16mm, enquanto o Fluff analisado nesse trabalho se limitou a fração entre 16mm e 50mm, sendo essa porção do resíduo mais rica em finos. O segundo ponto foram melhorias no processo como a instalação de um segundo Eddy Current, reduzindo assim o conteúdo de metais no Fluff.

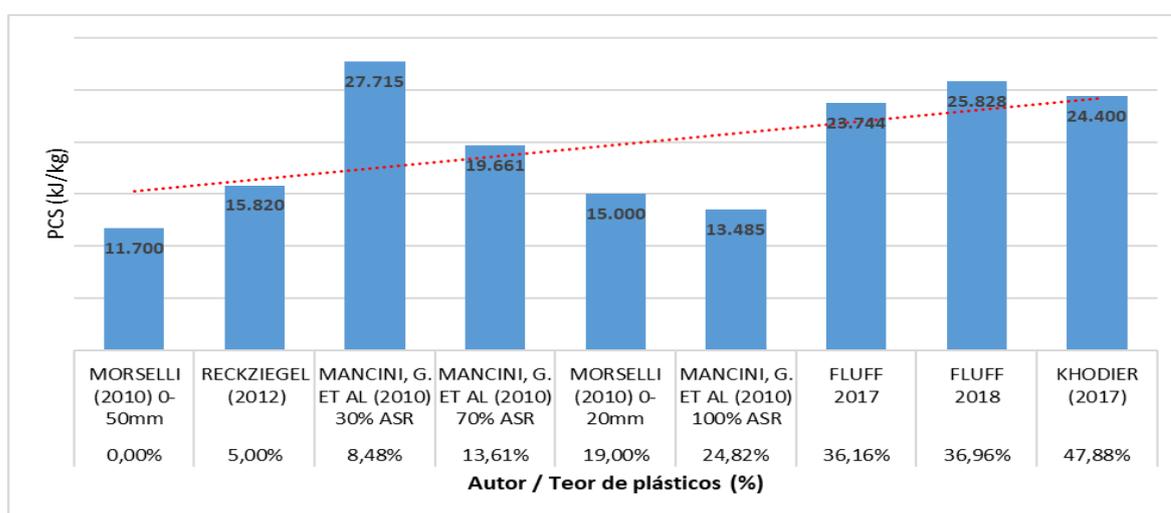
Tabela 7 - Tabela comparativa de composição, poder calorífico (base seca) e análise imediata do Fluff em diversos trabalhos

MATERIAL (%wt)	FLUFF 2018	FLUFF 2017	CIUCCIO (2004)	JOUNG et al (2007)	MORSELLI (2010)			Mancini, Tamma e Viotti (2010)			RECKZIEGEL (2012)	MANCINI, G. et al (2014)		Park, S.W., et al. (2016)	KHODIER, WILLIAMS & DIALLISON (2017)	NOTARNICOLA et al. (2017)	
					total	0-20mm	20-50mm	70% ASR	30% ASR	100% ASR		#1	#2			<30mm	>30mm
FINOS	31,05%	15,34%	16,00%	16,00%	45,00%	100,00%	x	56,03%	78,52%	69,58%	51,00%	x	x	6,92%	x	x	
ESPUMA	8,97%	16,18%	4,00%	17,00%	18,00%	x	32,00%	0,29%	0,07%	0,26%	x	x	x	2,94%	x	x	
FIBRAS/TECIDOS	2,66%	8,38%	4,00%	25,00%	9,00%	x	14,00%	2,40%	10,60%	12,27%	4,00%	x	x	10,35%	x	x	
PLÁSTICOS	36,16%	36,96%	32,00%	23,00%	19,00%	x	37,00%	24,82%	8,48%	13,61%	5,00%	x	x	47,88%	x	x	
BORRACHA	8,64%	10,38%	25,00%	x	7,00%	x	14,00%	8,19%	0,95%	0,44%	21,00%	x	x	15,88%	x	x	
MATERIAS ELÉTRICOS	0,67%	3,24%	x	x	x	x	x	0,67%	0,16%	1,10%	2,00%	x	x	1,76%	x	x	
METAIS FERROSOS	0,00%	0,70%	2,00%	x	1,00%	x	1,00%	0,11%	0,29%	0,29%	5,00%	x	x	0,47%	x	x	
METAIS NÃO FERROSOS	2,00%	2,43%	x	x	x	x	x	0,25%	0,18%	0,00%	x	x	x	x	x	x	
VIDRO	x	x	13,00%	x	x	x	x	x	x	0,63%	x	x	x	0,82%	x	x	
MADEIRA/PAPEL	9,84%	6,39%	4,00%	x	x	x	1,00%	7,07%	0,75%	0,41%	5,00%	x	x	12,92%	x	x	
OUTROS	x	x	x	19,00%	1,00%	x	x	x	x	x	7,00%	x	x	0,06%	x	x	
PCS(I)/G base seca	23744	25828	x	x	15000	11700	16400	13485,03	27714,82	19660,62	15819,7	19660,62	21911,61	24400	19000	21700	
PCI(I)/G	x	25637,0416	x	x	13800	10700	15200	12618,94	26087,24	18698,3	x	x	x	13800	17200	19900	
UMIDADE	3,74%	x	x	x	10,00%	13,80%	4,40%	16,00%	7,15%	15,41%	0,05%	15,41%	6,70%	22,00%	0,62%	1,64%	
VOLÁTEIS	66,62%	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	53,00%	76,63%	78,38%	
CARBONO FIXO	17,66%	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	5,00%	5,89%	4,76%	
CINZAS	11,98%	x	x	x	28,20%	40,40%	16,40%	54,40%	20,20%	44,70%	x	44,70%	27,22%	20,00%	16,86%	15,22%	
PAÍS	BRASIL	BRASIL	ITÁLIA	CORÉIA	ITÁLIA	ITÁLIA	ITÁLIA	BRASIL-RS	ITÁLIA	ITÁLIA	BRASIL-RS	ITÁLIA	CORÉIA	UK	ITÁLIA	ITÁLIA	

Fonte: Autor

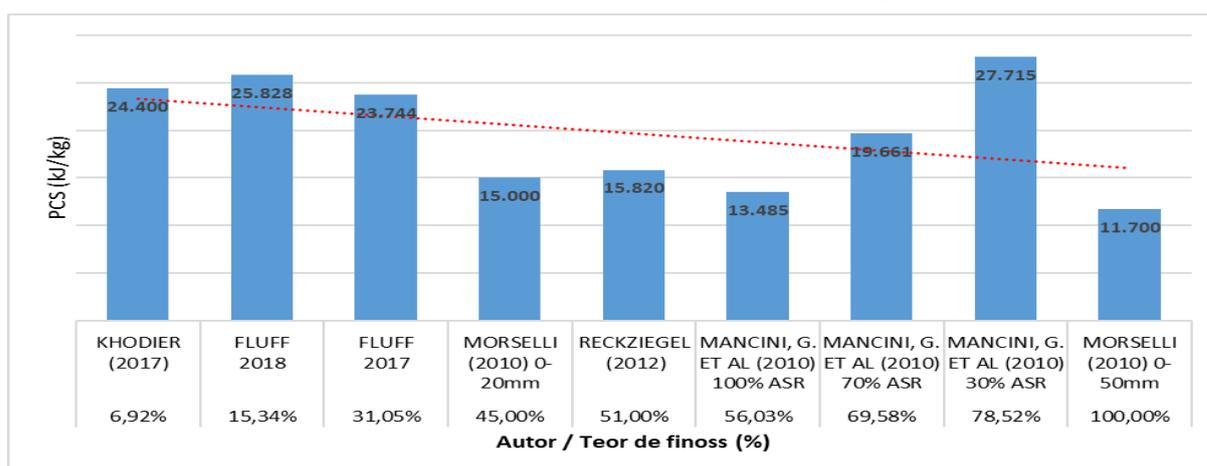
Outra relação interessante é a relação entre a composição do resíduo e o poder calorífico superior. Na Figura 38 vemos que quanto maior o teor de plástico no resíduo, maior o seu poder calorífico superior. Enquanto que o poder calorífico é inversamente proporcional ao teor de finos no resíduo, como mostra a Figura 39 e como encontrado nos resultados de Morselli et al. (2010). Cabe destacar que muito embora o teor de plásticos e finos impactem no poder calorífico do Fluff, muitos outros fatores influenciam no PCS desse resíduo tais como a presença de metais e a granulometria, como citado anteriormente.

Figura 38 - Gráfico relacionando o teor (%) de plástico no Fluff versus Poder Calorífico Superior (kJ/kg) em base seca. Em vermelho linha de tendência positiva



Fonte: Autor

Figura 39 - Gráfico relacionando o teor (%) de finos no Fluff versus Poder Calorífico Superior (kJ/kg) em base seca. Em vermelho linha de tendência negativa



Fonte: Autor

Observando a Tabela 7, percebe-se que a amostra analisada possui baixo teor de cinzas e de umidade, se comparada à literatura. Essas são características de um bom combustível. Na Tabela 8 encontra-se uma comparação dos resultados de análise imediata em base seca, obtidos no presente trabalho com os dados apresentados por Park et al. (2016) para combustíveis convencionais como o carvão mineral e a biomassa.

Tabela 8 - Comparação da Análise Imediata do Fluff obtida no presente trabalho com os parâmetros obtidos para o Carvão e Biomassa na literatura

(%wt)	FLUFF 2018	PARK et al. (2016) Carvão Betuminoso da China	PARK et al. (2016) Biomassa - cascas de frutas
UMIDADE	-	-	-
VOLATEIS	66,62%	38,44%	71,87%
CARBONO FIXO	17,66%	52,35%	21,56%
CINZAS	11,98%	9,21%	6,57%

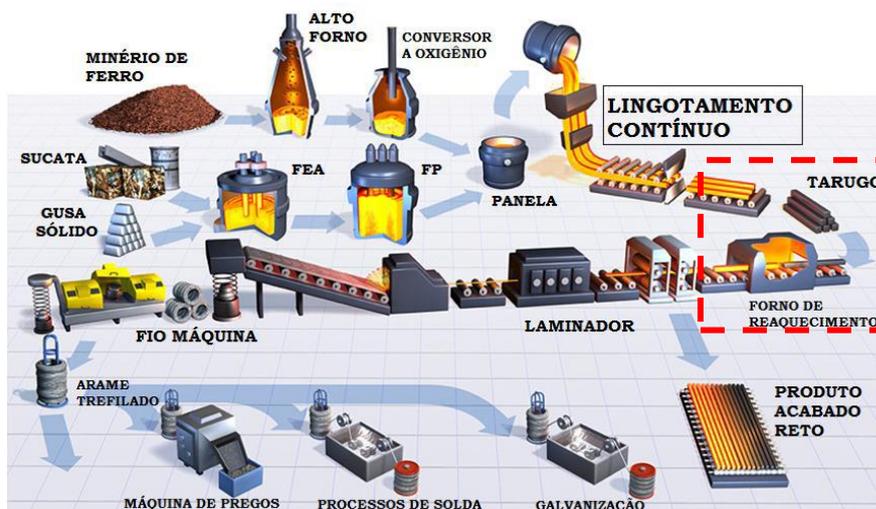
Fonte: Autor

5.6 Sugestão de aplicação para o Fluff em processo interno da planta

5.6.1 Forno de reaquecimento de tarugos para a laminação

No processo siderúrgico, após passar pelo lingotamento contínuo na aciaria, os tarugos são enviados para a laminação a quente para formar vergalhões e perfis de aço, como ilustrado na Figura 41. No entanto, na usina estudada no presente trabalho o fluxo não é contínuo e os tarugos após saírem do lingotamento esperam em um estoque intermediário para então entrar para a laminação. Nesse tempo de espera, o tarugo esfria e para atingir a temperatura de cerca necessária para a laminação a quente (cerca de 1117°C), os tarugos passam por um forno de reaquecimento.

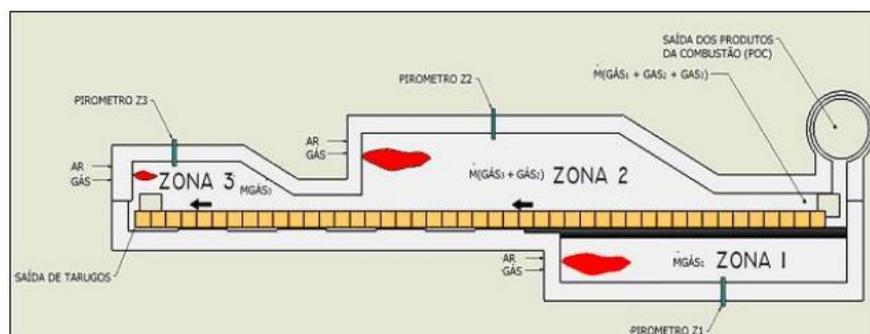
Figura 40 - Fluxograma das rotas do processo siderúrgico. Em destaque, o forno de reaquecimento de tarugos para a laminação



Fonte: GERDAU, 2017

O forno de reaquecimento de tarugos, representado na Figura 42, possui 3 zonas de aquecimento e opera continuamente com capacidade máxima de 60ton/h, ou seja, aproximadamente 120 peças/hora. Segundo Lira Júnior (2007) o processo de reaquecimento dos tarugos com um ritmo de 108 peças por hora utiliza em média $1322\text{Nm}^3/\text{h}$ de gás natural, cujo Poder Calorífico e densidade é 36.000kJ/kg e $0,78\text{kg}/\text{Nm}^3$ respectivamente.

Figura 41- Esquema geral da região interna do forno de reaquecimento de tarugos para a laminação



Fonte: (LIRA JÚNIOR, 2007)

No presente trabalho, foi levantado através de um balanço de massa realizado na planta Shredder em 2018 que a produção média do Fluff miúdo (entre 16 e 50mm) é de 33,3 kg por tonelada de sucata processada no Shredder. Além disso, através dos

ensaios realizados com a bomba calorimétrica, foi levantado que o Poder Calorífico Superior em base úmida desse resíduo da sucata é em média, 22829 kJ/kg.

Dessa forma, existe um potencial de recuperação energética do Fluff através da queima direta desse resíduo de 760.206 kJ por tonelada de sucata processada, segundo equação 5.1.

$$E_{Fluff} = M \cdot PCS \quad (5.2)$$

Onde E_{fluff} é a energia que pode ser extraída do Fluff em kJ/ton; M é a massa do resíduo gerado pela planta Shredder (em kg/ton) e PCS é o poder calorífico superior do Fluff na base úmida em kJ/kg.

Dessa forma, utilizando a equação 5.2, com direcionamento dos gases de combustão do Fluff para o forno de reaquecimento de tarugos para a laminação, é possível obter uma redução no consumo de gás natural da laminação de cerca de 27Nm³ por tonelada de sucata processada, assumindo-se um ritmo de 108 peças por hora no forno de laminação.

$$Q_{gn} = \frac{E_{gn}}{\rho_{gn} \cdot PC_{gn}} \quad (5.3)$$

Onde E_{gn} é a energia que pode ser extraída do gás natural no mês em KJ; Q é volume de gás natural consumido (Nm³/h) e PC_{gn} é o Poder Calorífico do gás natural em KJ/kg. Os resultados obtidos assim como os parâmetros utilizados estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros assumidos e resultados obtidos da simulação do uso da queima direta do Fluff para redução do consumo de gás natural no forno de reaquecimento da laminação

Parâmetro	Valor	Unidade
Ritmo do forno da laminação	108	peças/h
Volume de Gás natural utilizado Q_{gn}	1.322	Nm ³ /h
Poder Calorífico do gás natural PC_{gn}	36.000	kJ/kg
Densidade do gás natural ρ_{gn}	0,78	kg/Nm ³
PCS do Fluff (base úmida) PCS	22.829	kJ/kg
Produção do Fluff	33,3	kg/ton
Potencial de energia do fluff E_{Fluff}	760.206	kJ/ton
Potencial de economia de gás natural	27	Nm³/ton

Fonte: Adaptado de Lira Júnior (2007)

Além disso, segundo (GERDAU, 2018) a destinação do Fluff ao aterro sanitário gera um custo de R\$ 63,00 com aterramento por tonelada de material. Ou seja, considerando uma proporção de 33,3 kg de Fluff gerado por tonelada de sucata processada e assumindo a capacidade máxima do Shredder de 120 ton/h, e operando 8h por dia, 30 dias por mês, resulta em um gasto de mais de R\$ 725 mil por ano, como ilustrado na

Tabela 10 - Parâmetros assumidos para o cálculo do gasto anual com destinação do Fluff a aterros

Parâmetro	Valor	Unidade
custo aterro/ton	R\$ 63,00	/ton
produção max de sucata (mês)	28.800	ton/mês
produção max de fluff (mês)	959,04	ton/mês
saving mensal com aterro (máximo)	R\$ 60.419,52	/mês
saving anual com aterro	R\$ 725.034,24	/ano

Fonte: Autor

Além disso, segundo Park et al. (2016) o Fluff possui alto teor de cloro o qual, em processos térmicos, gera dioxinas que são extremamente tóxicas aos seres humanos, assim sendo, faz-se necessário o controle dos cloretos no Fluff para utilizá-lo termicamente. Outra recomendação é o tratamento dos gases de exaustão para evitar a emissão de particulados na atmosfera.

6 CONCLUSÕES

A caracterização do Fluff, resíduo do processamento de sucata em uma planta Shredder no Recife, desenvolvida no presente trabalho trouxe resultados interessantes. O Fluff é constituído principalmente por polímeros, materiais que conferem ao resíduo um alto poder calorífico, mas, em contra partida, podem produzir substâncias tóxicas na queima, como visto na literatura.

Comparando o material analisado no presente trabalho com os resultados obtidos por outros autores em outras plantas, foi possível obter correlações interessantes. Os finos, que em geral são uma porção significativa do resíduo são ricos em óxidos e materiais com baixo potencial energético, sendo prejudiciais à qualidade do combustível, não só por reduzir o seu poder calorífico, mas também por aumentar o teor de cinzas geradas na queima. Assim sendo, o teor de finos no Fluff deve ser reduzido utilizando métodos de peneiramento mais eficientes.

O baixo teor de umidade junto ao elevado poder calorífico define o Fluff como uma matriz energética interessante. Neste trabalho, foi considerada a queima direta da fração entre 16 e 50mm do resíduo para redução no consumo de gás dos fornos de reaquecimento de tarugos da laminação podendo gerar uma redução no consumo de gás natural de 27 Nm³ por tonelada de sucata processada e uma redução de até R\$ 725 mil de custo por ano com aterramento do resíduo. Deve-se considerar, no entanto, que o Fluff é um material bastante heterogêneo, sendo tão variável que não se pode assumir automaticamente que os processos desenvolvidos em uma planta Shredder provará ser adequado para outras fontes do resíduo.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se refinar o a proposta de utilização do Fluff como fonte energética para o forno de aquecimento, levando em conta o investimento no projeto do sistema para queima do Fluff assim como gastos com o tratamento dos gases de exaustão e manutenção do processo.

Do ponto de vista energético, é interessante a execução da análise elementar do Fluff a qual não só forneceria dados importantes para a modelagem teórica da reação de combustão, mas também possibilitaria a obtenção do Poder Calorífico Inferior. Outro ponto interessante para futuros trabalhos seria a análise imediata e do

poder calorífico para cada fração granulométrica do material como forma de comparar com os resultados existentes na literatura e recomendar aplicações específicas para cada faixa.

Além disso, para a execução de uma análise ambiental dos cenários é bastante pertinente a análise dos gases de exaustão assim como verificar a formação de compostos ácidos clorados na queima do combustível.

REFERÊNCIAS

AALBORG INDUSTRIES. aalborg industries. aalborg industries, 2017. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

ASTM E 711 – 87. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. ASTM. [S.l.]. 2004.

BOUGHTON, B.; HORVATH, A. An Environmental assessment of shredder residue management. Resources, Conservation and Recycling, Berkeley, CA, USA, v. 47, p. 3-25, Novembro 2006.

CIUCCIO, M. T. P. Estudo de tendências e oportunidades no desenvolvimento sustentável para a reciclagem de veículos e seus materiais. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, São Carlos, 2004.

COSSU, R. et al. Review of Italian experience on automotive shredder residue characterization and management. Waste Management, Padova, Italy, v. 34, 2014.

COSSU, R.; LAI, T. Automotive Shredder Residue (ASR) management: An overview. Waste Management, Bologna, Italy, 2015.

EPE. - Empresa de pesquisa energética, Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro., Rio de Janeiro, 2009.

GARCIA, R. Combustíveis e combustão industrial. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

GERDAU. GERDAU, 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt>>. Acesso em: 11 dez. 2017.

GERDAU. Relatório Interno da Gerdau. Gerdau. Recife. 2018.

JONES, J. A. T. . B. B. L. P. A. Electric Arc Furnace Steelmaking, in: Steelmaking and Refining Volume, The AIST Steel Foundation, Pittsburgh, PA, 1998.

KHODIER, A.; WILLIAMS, K. S.; DALLISON, N. PILOT-SCHALE THERMAL TREATMENT OF AUTOMOTIVE SHREDDER RESIDUE: PYROLYSIS CHAR IS A RESOURCE OR WASTE. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Lancashire, UK, v. 224, 2017.

LABCONTROL. Labcontrol instrumentos científicos. Labcontrol, 2017. Disponível em: <<http://labcontrol.com.br/analizador-termogravimetrico-tga-1000/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

LIRA JÚNIOR, J. C. D. Simulação numérica de um forno de reaquecimento, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2007.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. R. D. Geração Termelétrica; Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, 2004.

MANCINI, G. et al. Full-scale treatment of ASR wastes in a modified rotary kiln. Waste management, Catania, Italy, v. 34, August 2014.

MANCINI, G.; TAMMA, R.; VIOTTI, P. Thermal process of fluff: Preliminary tests on a full-scale treatment plant. Waste Management, Catania, Itália, v. 30, p. 1670-1982, março 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Matriz Energética Nacional 2030. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - SPE. Brasília. 2007.

MORSELLI, L. et al. Automotive Shredder Residue (ASR) characterization for a valuable management. Waste Management, Bologna, Italy, 2010.

MOURÃO, M. B. Introdução à siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

NETZSCH. netsch. netsch thermal analysis, 2017. Disponível em: <<https://www.netsch-thermal-analysis.com/pt/produtos-solucoes/analise-termogravimetrica/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

NOTARNICOLA, M. et al. Pyrolysis of automotive shredder residue in a bench scale rotary kiln. Waste Management, Bari (BA), Itália, 2017.

PARK, S. W. et al. For Waste to Energy, Assessment of Fluff Type Solid Refuse Fuel by Thermal Characteristics Analyses. Procedia Environmental Sciences, Wonju, Republica da Coréia, v. 35, p. 498-505, 2016.

PORTAL WENDTCORP. PORTAL WENDTCORP. PORTAL WENDTCORP, 2017. Disponível em: <<http://www.wendtcorp.com/products/shredders/>>. Acesso em: 05 Novembro 2017.

RAMOS E PAULA, L. E. D. et al. CHARACTERIZATION OF RESIDUES FROM PLANT BIOMASS FOR USE IN ENERGY GENERATION, Lavras, MG, v. 17, n. 2, p. 237-248, jun 2011.

RECKZIEGEL, V. N. Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma indústria siderúrgica, Porto Alegre, 2012.

REM, P. C. et al. GRADE AND RECOVERY PREDICTION FOR EDDY CURRENT SEPARATION PROCESSES. Magnetic and Electrical Separation, Delft, Netherlands, v. 9, p. 83-94, march 1998.

ROSSI, D. Influência da Proporção entre as Vazões de Oxigênio e Gás Natural do Sistema de Injeção na Eficiência Energética de um Forno Elétrico a Arco, Porto Alegre, 2014.

SOUZA, E. R. D. Uso Intensivo de Sucata Triturada no Forno Elétrico a Arco.. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, Belo Horizonte, 2015.

STEINERT. STEINERT GLOBAL, 2017. Disponível em: <<http://www.steinertglobal.com/br/pt/equipamentos/>>. Acesso em: 20 Dezembro 2017.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. worldsteel.org. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/global-map.html>>. Acesso em: 07 abril 2019.